CIENCIA DE MATERIALES

APLICACIONES EN INGENIERÍA

JAMES NEWELL

Apoyo en la web



Ciencia de Materiales
Aplicaciones en Ingeniería

Ciencia de Materiales Aplicaciones en Ingeniería

James Newell
Rowan University



Corrección técnica:
Ing. Raúl Gilberto Valdez Navarro
Facultad de Ingeniería - Departamento de Materiales y Manufactura, UNAM
Formación:
Editec
Al cuidado de la edición:
Luz Ángeles Lomelí Díaz
lalomeli@alfaomega.com.mx
Gerente editorial:
Marcelo Grillo Giannetto
mgrillo@alfaomega.com.mx

Datos catalográficos
Newell, James
Ciencia de materiales. Aplicaciones en Ingeniería
Primera Edición
Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México
ISBN: 978-607-707-114-3
Formato: 20 x 25.5 cm Páginas: 368

Ciencia de materiales. Aplicaciones en Ingeniería
James Newell
ISBN: 978-0-471-75365-0 edición original en inglés “Essentials of modern materials science and engineering” publicada por John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA.

Primera edición: Alfaomega Grupo Editor, México, diciembre 2010

Pitágoras 1139, Col. Del Valle, 03100, México D.F.

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana
Registro No. 2317

Pág. Web: **http://www.alfaomega.com.mx**
E-mail: **atencionalcliente@alfaomega.com.mx**

ISBN: 978-607-707-114-3

Impreso en México. Printed in Mexico.

Empresas del grupo:

México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. – Pitágoras 1139, Col. Del Valle, México, D.F. – C.P. 03100.
Tel.: (52-55) 5575-5022 – Fax: (52-55) 5575-2420 / 2490. Sin costo: 01-800-020-4396
E-mail: atencionalcliente@alfaomega.com.mx

Colombia: Alfaomega Colombiana S.A. – Carrera 15 No. 64 A 29, Bogotá, Colombia,
Tel.: (57-1) 2100122 – Fax: (57-1) 6068648 – E-mail: cliente@alfaomega.com.co

Chile: Alfaomega Grupo Editor, S.A. – Dr. La Sierra 1437, Providencia, Santiago, Chile
Tel.: (56-2) 235-4248 – Fax: (56-2) 235-5786 – E-mail: agechile@alfaomega.cl

Argentina: Alfaomega Grupo Editor Argentino, S.A. – Paraguay 1307 P.B. Of. 11, C.P. 1057, Buenos Aires, Argentina, – Tel./Fax: (54-11) 4811-8352, 4811 7183 y 4811 0887 – E-mail: ventas@alfaomegaeditor.com.ar



Este libro está dedicado a mi hija, Jessica Lauren Newell, cuya sobresaliente paciencia y amor incondicional hicieron que valieran la pena las largas noches y fines de semana de mi trabajo en este libro.

ACERCA DEL AUTOR



El doctor Newell nació en Turtle Creek, Pennsylvania (suburbio de Pittsburg). Obtuvo el grado de Licenciado en Ingeniería Química y Biomédica de la Carnegie-Mellon University en 1988, la Maestría en Ingeniería Química de Penn State en 1990, y el Doctorado en Ingeniería Química por la Clemson University en 1994. Su tesis se concentró en la conversión de PBO a fibra de carbono, y recibió el premio de la Carbon Society's Mrozowski por la mejor tesis en 1993. Después de terminar su doctorado, se quedó en Clemson durante un año como profesor asistente visitante antes de aceptar un puesto como profesor en la Universidad de North Dakota en 1995. Se mudó a la Rowan University como profesor asociado en 1998 y fue promovido a profesor de tiempo completo en 2004. Empezó a fungir como asociado interino para Asuntos Académicos en 2007.

El doctor Newell ha publicado más de 30 artículos en *Chemical Engineering Education, High-Performance Polymers, Carbon, International Journal of Engineering Education, Journal of SMET Education, Recent Research Development in Applied Polymer Science, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Journal of Applied Polymer Science* y *Advances in Engineering Education*; autor de la sección de fibras de carbono para la *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, 3a edición, y co-autor de un capítulo del libro de texto sobre la rotación de los precursores de la fibra de carbono. También fungió como testigo experto en una demanda a nivel nacional respecto al defecto de los chalecos a prueba de balas. Su trabajo ha sido presentado en conferencias internacionales en España, Argentina, Austria, Inglaterra, Australia y Estados Unidos. En 2001, recibió el premio Raymod W. Fallen por parte de The American Society for Engineering Education (ASEE) por sus contribuciones a la educación de la ingeniería. En 1997, fue nombrado el Nuevo Miembro de la Facultad Sobresaliente por la Sección North Midwest Section de ASEE. Sus actuales actividades de investigación incluyen la examinación de las relaciones de estructura-propiedad en compuestos de alto desempeño, mejorando los materiales de balística, y desarrollando equipos de ingeniería metacognoscitiva.

El doctor Newell es un ávido admirador del béisbol, admirador de los Steelers de toda la vida y lector voraz. Su libro favorito es *A Prayer for Owen Meany* de John Irving. Disfruta pasar tiempo con su esposa, Heidi, su hija Jessica (quien nació el 17 de enero de 2000) y sus tres gatos: Dakota, Bindi y Smudge.

PREFACIO

¿Por qué debe usar este libro?

- Es *práctico y aplicable*. Es nuestro objetivo que los alumnos estén preparados para tomar decisiones informadas sobre selección de materiales después de completar el curso y usar este texto.
- Está *equilibrado*. Se presentan una variedad de materiales para proporcionar un amplio espectro de materiales disponibles para los ingenieros.
- Es *visual*. El fuerte uso de los apoyos visuales de este libro ayuda a los alumnos a entender los conceptos mejor que sencillamente leyendo acerca de éstos.

Filosofía

El autor ha enseñado ciencia de los materiales desde hace 12 años. Al no haber encontrado un texto que pudiera adecuarse completamente a su curso y a sus alumnos, desarrolló este texto más pequeño y más concentrado, adecuado para:

- Programas de ingeniería (incluyendo las ingenierías aeroespacial, biológica, química, civil, eléctrica, industrial y mecánica y otras) que ofrecen sólo un curso de un semestre o de un trimestre de ciencia de los materiales.
- Cobertura balanceada y adecuada de metales, polímeros, compuestos y áreas de importancia que incluyen biomateriales y nanomateriales.
- Enfoque en los asuntos fundamentales que son factores para la selección de materiales y diseño incluyendo ética, consideraciones de los ciclos de vida y economía.
- Enseñanza de las propiedades de los materiales, y manejo de la variabilidad en la medición, dejando a los alumnos preparados para medir las propiedades de los materiales y para interpretar los datos.

Este libro inicia con cuatro temas fundamentales:

- Las propiedades de un material están determinadas por su estructura. El procesamiento puede alterar esa estructura en formas específicas y predecibles.
- El comportamiento de los materiales se fundamenta en la ciencia y es entendible.
- Las propiedades de todos los materiales cambian con el tiempo, con el uso y con la exposición a las condiciones ambientales.
- Cuando se seleccionan los materiales, se deben llevar a cabo pruebas suficientes y apropiadas como para asegurar que el material permanecerá adecuado durante toda la vida razonable del producto.

Público

Este texto asume que los alumnos están al menos familiarizados con los enlaces químicos básicos y la tabla periódica. Pero es un curso de materiales introduc-

torio, así que no habrá ecuaciones diferenciales, teoría de precolación; física cuántica detallada, termodinámica estadística u otros tópicos más avanzados.

Enfoque en conceptos clave y fundamentos

Este libro está diseñado como una introducción al campo, no como una guía completa de comprensión de todo el conocimiento de la ciencia de los materiales. En vez de ahondar en grandes detalles en muchas áreas, el libro proporciona los conceptos claves y los fundamentos que los alumnos necesitan comprender sobre la ciencia de los materiales y puedan tomar decisiones informadas. Un ejemplo de la filosofía se encuentra en la sección de ensayo de los materiales. Aunque existen variaciones incontables en las técnicas de ensayo, el capítulo se enfoca en los principios operativos y la propiedad a ser medida, en lugar de que los alumnos se concentren en la exposición de variaciones y excepciones. Ese material está más allá del alcance de la mayoría de los cursos introductorios.

Economía, medio ambiente, ética y ciclo de vida

La importancia de la economía en la toma de decisiones y la consideración del ciclo de vida completo de los productos son los temas que se mencionan a través del libro y aparecen en los problemas de tarea en casi todos los capítulos. Los íconos en los márgenes identifican áreas del libro con este enfoque:



Pedagogía

TONO DE CONVERSACIÓN

El libro está escrito en tono de conversación, diseñado para facilitarle a los alumnos el aprendizaje. Cuando el autor hizo un piloto del texto en sus clases de ciencia de los materiales, los comentarios anónimos de sus alumnos incluían declaraciones como “No necesité leerlo cinco veces para empezar a entenderlo”.

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Los objetivos de aprendizaje detallados en el inicio de cada capítulo proporcionan objetivos específicos del capítulo. Resaltan lo que debería ser capaz de hacer si realmente entiende el material.

RESUMEN DEL CAPÍTULO

Un resumen al final de cada capítulo recapitula los objetivos de aprendizaje.

PROBLEMAS DE TAREA

Los problemas de tarea al final de cada capítulo son una mezcla de preguntas numéricas (por ejemplo, calcular la resistencia a la tracción de una viga de 0.509 $pulg^2$) y preguntas cualitativas abiertas (por ejemplo, comparar y contrastar las ventajas y desventajas de los rellenos hechos de compuestos dentales con aquellos hechos de amalgama) que requieren un entendimiento más profundo y explicaciones más detalladas que son más difíciles de copiar.

Cobertura de tópicos y organización

El primer capítulo es una introducción a las clases de materiales y una cobertura breve de las cuestiones que impactan en la selección y diseño de materiales (química, sustentabilidad e ingeniería verde, economía y así sucesivamente). El capítulo 2 se concentra en la estructura de los materiales (cristalografía) y cómo los defectos impactan tales estructuras. El capítulo 3 introduce a las propiedades materiales fundamentales de los materiales y los ensayos básicos utilizados para medir dichas propiedades. Los capítulos 4 a 7 introducen a las clases principales de los materiales, incluyendo nuevos tópicos necesarios para entender la ciencia de refuerzo y la consideración de las aplicaciones comerciales. El capítulo 8 se dedica a las propiedades electrónicas y ópticas de los materiales. Aunque los materiales comentados en este capítulo son metales, polímeros, cerámicos y compuestos, poseen propiedades eléctricas u ópticas únicas que generan aplicaciones comerciales significativas, y, como tal, garantizan la cobertura individual. El capítulo 9 trata de la nueva área de la biología y los biomateriales. Este capítulo introduce el concepto de bio-compatibilidad, y examina cómo los biomateriales modernos se utilizan para reemplazar o reforzar las funciones de los materiales biológicos.

Sitio web

El sitio web que acompaña a este texto ubicado en www.alfaomega.virtual.com.mx es un recurso valioso para alumnos e instructores.

SITIO DE ASISTENCIA AL ALUMNO

Animaciones: ideas clave que se representan mejor de forma electrónica, en lugar de una representación bidimensional de un libro de texto, se desarrollaron como animaciones. Este ícono en el margen identifica cuándo una animación está disponible para más detalles.

SITIO DE ASISTENCIA AL INSTRUCTOR

Manual de soluciones del instructor: las soluciones completas de todos los problemas de tarea en el texto.

Galería de imagen: las ilustraciones y tablas del texto, adecuadas para uso en plantillas de lectura.

Plantillas de lectura: notas de lectura desarrolladas por el autor.

Los recursos del instructor sólo están disponibles para los instructores que adopten este libro para su curso. Visite la sección del sitio web para registrarse y obtener una contraseña.

RECONOCIMIENTOS

Quiero agradecer a un grupo especial de alumnos quienes participaron en la crítica de este texto, los problemas de tarea y el contenido de este libro. Me pareció que si iba a escribir un libro para ayudar a los alumnos, debería involucrar a los alumnos en cada uno de los pasos de esta creación. Fui muy afortunado al tener un grupo dedicado de alumnos de Ingeniería Química, Civil, Eléctrica y Mecánica. Matthew Abdallah, Mike Bell, Dean Dodaro, Donna Johnson, Laura Kuczynski, Sarah Miller, Blanca Ortiz, Kevin Pavon, Jessica Prince, Jennifer Roddy y Jason Worth, todos ellos contribuyeron mucho y sus esfuerzos son apreciados. Quiero agradecer también a los doctores Michael Grady y Will Riddell, quienes ofrecieron una valiosa retroalimentación en las primeras versiones de este manuscrito.

No hay forma de agradecer suficientemente al maravilloso grupo de profesionales de Wiley. Mark Owens, Elle Wagner, Lauren Sapira y Sujin Hong que son un grupo talentoso que nunca se cansó de responder a mis muchas preguntas y proporcionarme la ayuda necesaria. Quiero agradecer a Joe Hayton, mi primer editor, por ayudarme con la concepción de este libro, y mi nueva editora, Jenny Welter, por sus muchas contribuciones y ayudarme a llevarlo con bien hasta el final. Soy increíblemente afortunado de haber trabajado con dos profesionales talentosos y dedicados.

Quiero extender un agradecimiento especial a mi esposa, la doctora Heidi L. Newell, por revisar esmeradamente múltiples borradores del texto y por recordarme constantemente que estaba escribiendo para alumnos de segundo grado en licenciatura.

Finalmente, quiero agradecer a los siguientes revisores:

Marwan Al-Haik, *University of New Mexico*

Philip J. Guichelaar, *Western Michigan University*

Oscar Perales-Perez, *University of Puerto Rico*

Jud Ready, *Georgia Institute of Technology*

John R. Schlup, *Kansas State University*

Chad Ulven, *North Dakota State University*

James Newell

CONTENIDO BREVE



CONTENIDO


3

4

Metales 104

5

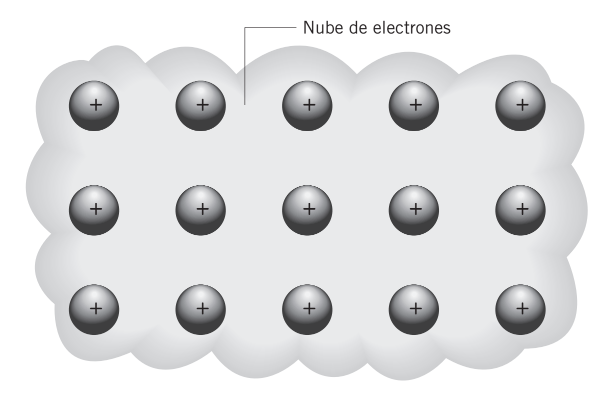
Polímeros 148



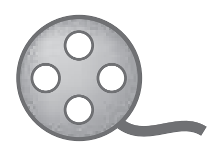
LISTA DE ANIMACIONES

Las ideas clave representadas en forma bidimensional en el libro de texto están desarrolladas como animaciones electrónicas para su mejor comprensión.

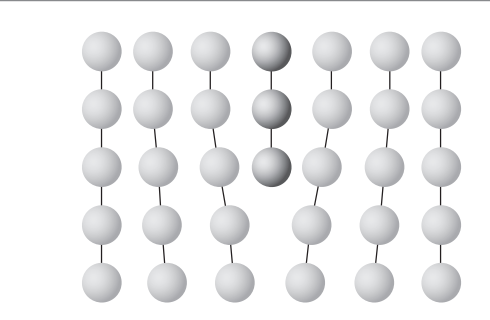
En el libro, este ícono identifica las animaciones que están disponibles para mayor referencia del tópico a ser comentado. Visite el sitio web del libro en www.alfaomega.virtual.com.mx para acceder a estas animaciones.



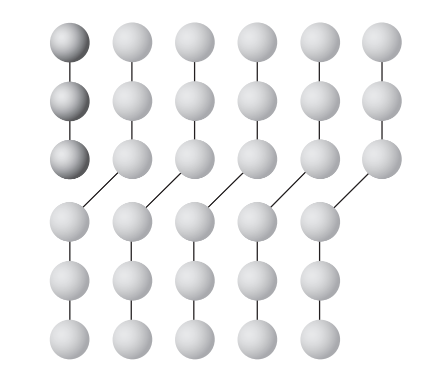
1. Figura 1-16 Nube de electrones (*página 17*)



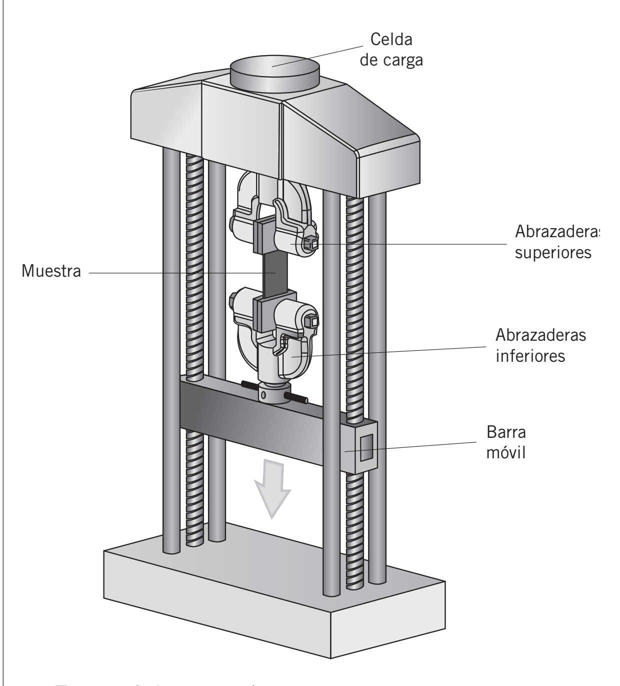
2. Nucleación homogénea que lleva al crecimiento del grano (*página 53*)
3. Nucleación heterogénea que lleva al crecimiento de grano (*página 53*)



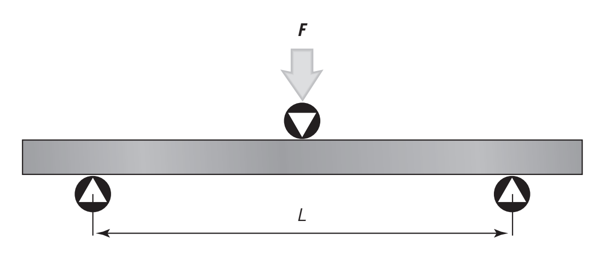
4. Figura 2-16 Dislocación de borde (*página 56*)



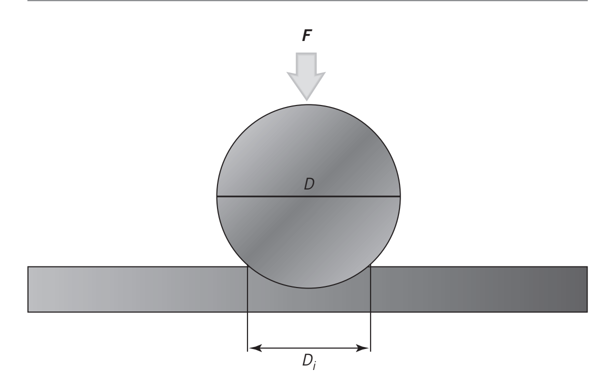
5. Figura 2-17 Dislocación de tornillo (*página 56*)



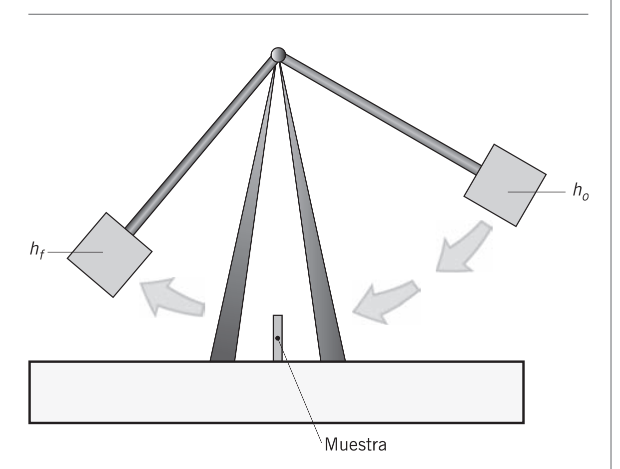
6. Figura 3-1 Ensayo de tracción (*página 72*)



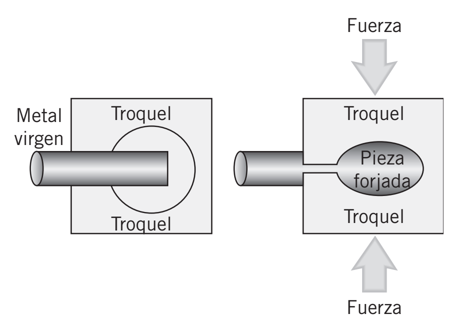
7. Figure 3-6 Ensayo de flexión de tres puntos (*página 80*)



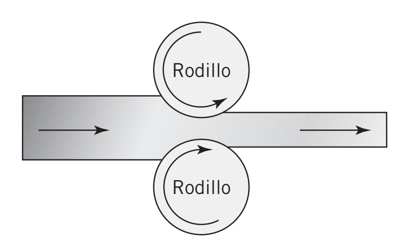
8. Figure 3-7 Ensayo Brinell (*página 81*)



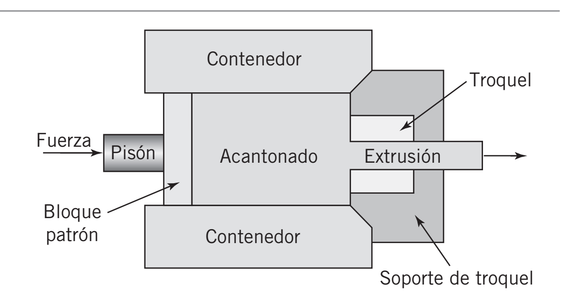
9. Figure 3-12 Ensayo Charpy (*página 85*)



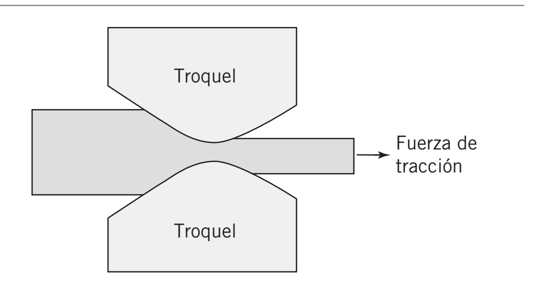
10. Table 4-1 Operaciones de conformado: forjado (*página 107*)



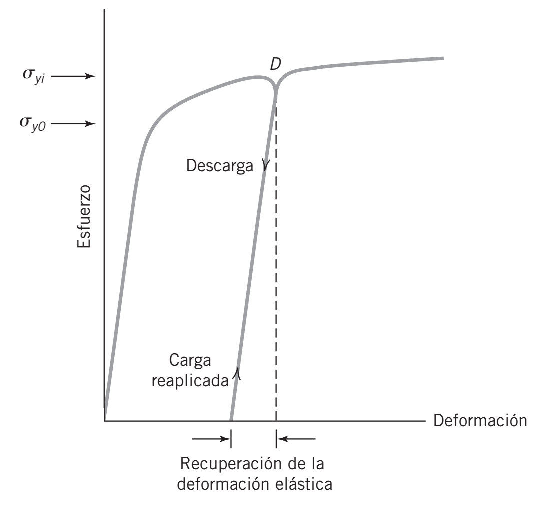
11. Table 4-1 Operaciones de conformado: laminado (*página 107*)



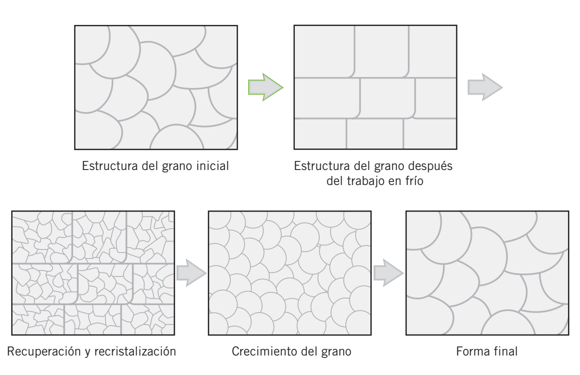
12. Table 4-1 Operaciones de conformado: extrusión (*page 107*)



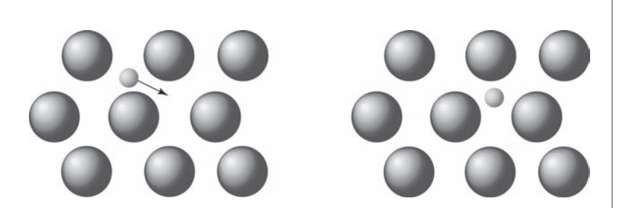
13. Table 4-1 Operaciones de conformado: trefilado (*página 107*)



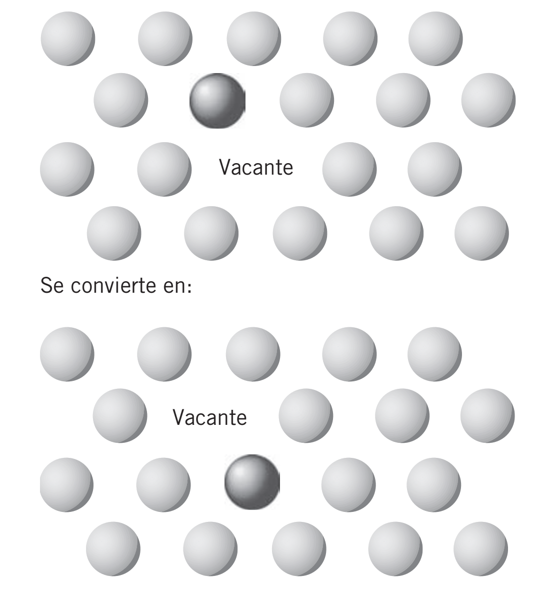
14. FIGURA 4-1 Carga-descarga (*página 108*)



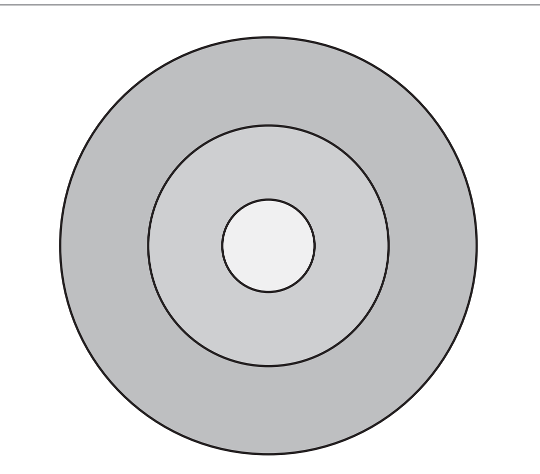
15. FIGURA 4-2 Recuperación (*página 109*)



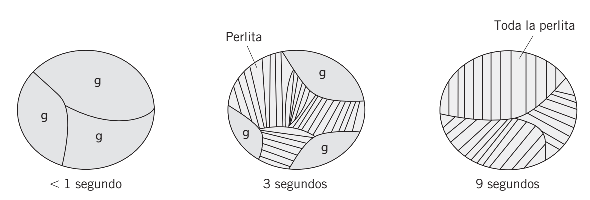
16. FIGURA 4-6 Difusión intersticial (*página 115*)



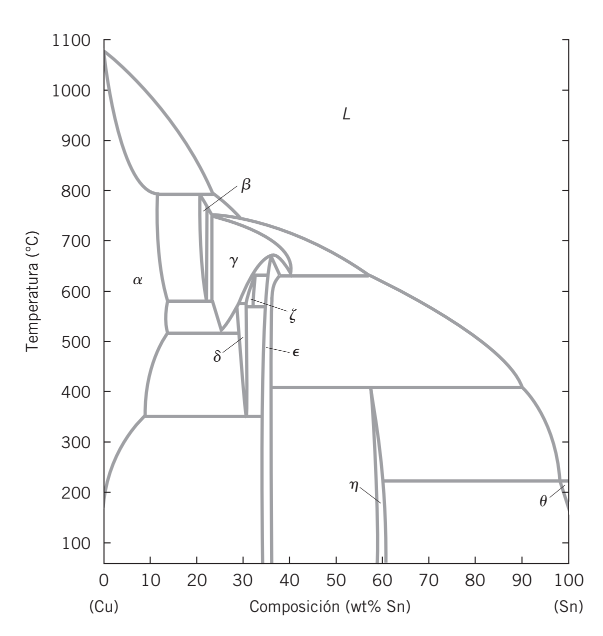
17. FIGURA 4-7 Difusión de la vacante (*página 115*)



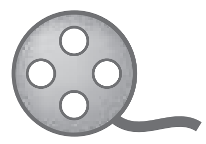
18. FIGURA 4-9 Segregación (*página 116*)



19. FIGURA 4-22 Fase de transformación y crecimiento del grano (*página 129*)



20. Figura 4-28 Celda electroquímica (*página 134*)



21. Movimiento del polímero cerca de la temperatura de transición vítrea (*página 160*)

Iniciación

HO—OH + Luz ⟶ 2HO•

El radical libre reacciona con el primer monómero

$HO\cdot + CH_2{=}CH_2 \rightarrow HO{-}CH_2{-}CH_2\cdot$

Propagación (se repite hasta la terminación)

$HO{-}[CH_2{-}CH_2]_m\cdot + CH_2{=}CH_2 \rightarrow HO{-}[CH_2{-}CH_2]_{m+1}\cdot$

Propagación (se repite hasta la terminación)

Terminación primaria

$HO{-}[CH_2{-}CH(C_6H_5)]_M\cdot + \cdot OH \rightarrow HO{-}[CH_2{-}CH(C_6H_5)]_M{-}OH$

Terminación mutua

$HO{-}[CH_2{-}CH(C_6H_5)]_M\cdot + \cdot[CH_2{-}CH(C_6H_5)]_N{-}OH \rightarrow HO{-}[CH_2{-}CH(C_6H_5)]_{M+N}{-}OH$

22. Figura 5-22 Polimerización por adición (*página 162*)

HO—C(=O)—C_6H_4—C(=O)—OH HO—CH_2CH_2—OH

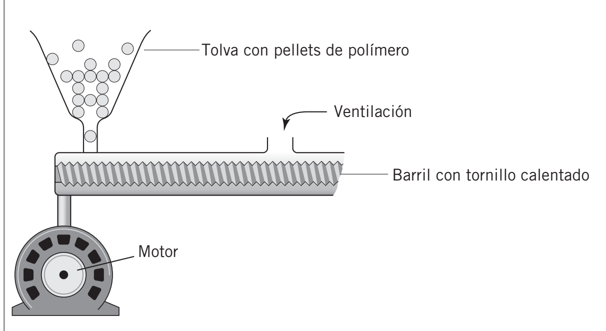
Ácido tereftálico Etilén glicol

Produce

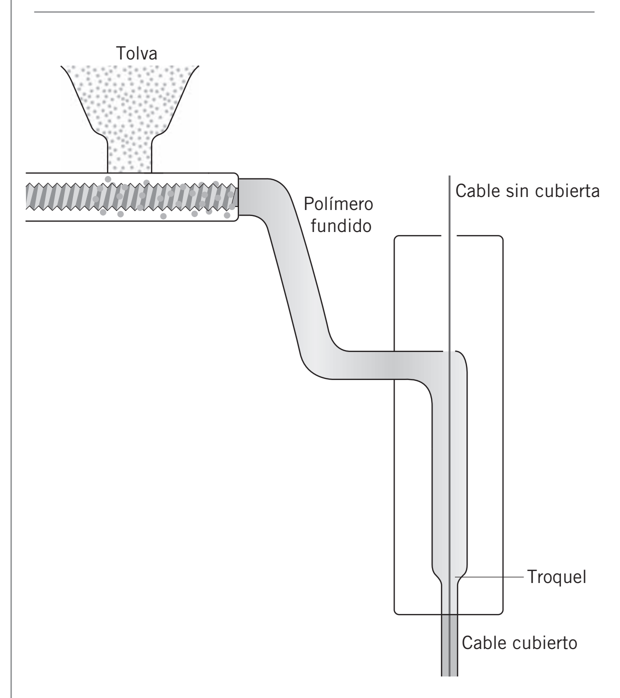
HO—C(=O)—C_6H_4—C(=O)—O—CH_2CH_2—OH + H_2O

Tereftalato de polietileno (PET) y agua

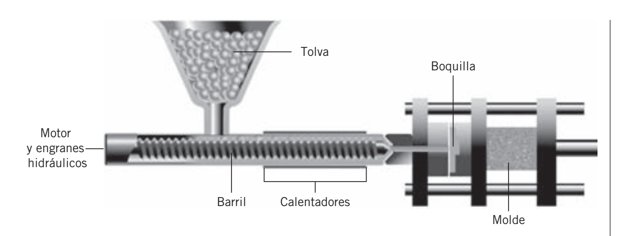
23. Figura 5-25 Condensación (*página 165*)

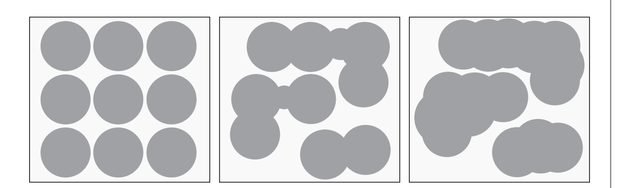


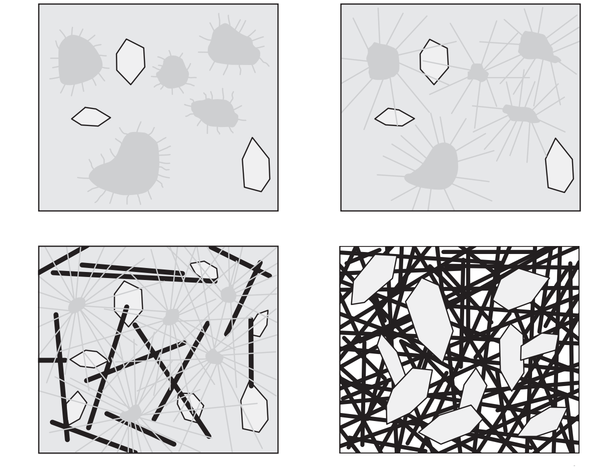
24. Figura 5-34 Extrusor (*página 178*)

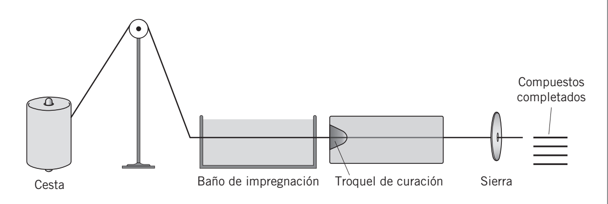


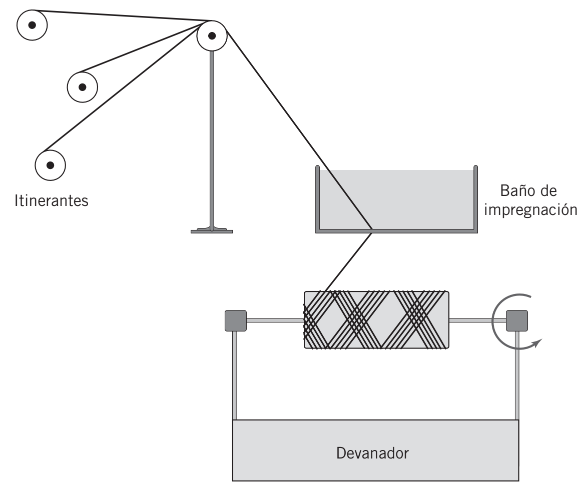
25. Figure 5-35 Recubrimiento de un cable (*página 178*)

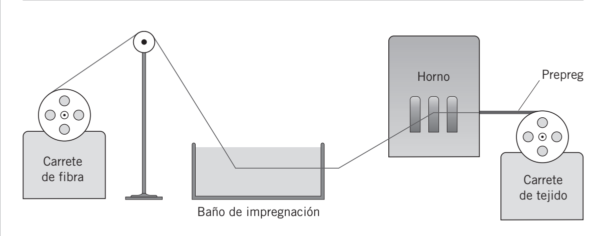

Tolva
Boquilla
Motor
y engranes
hidráulicos
Barril
Calentadores
Molde

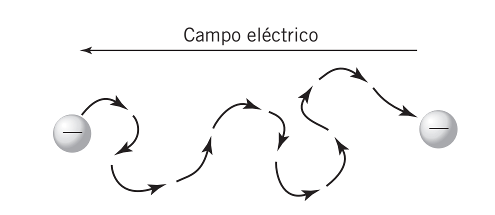


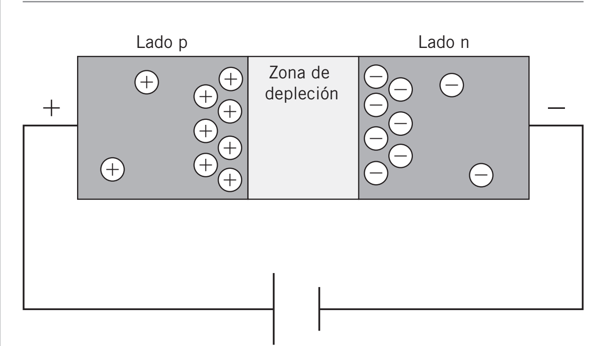


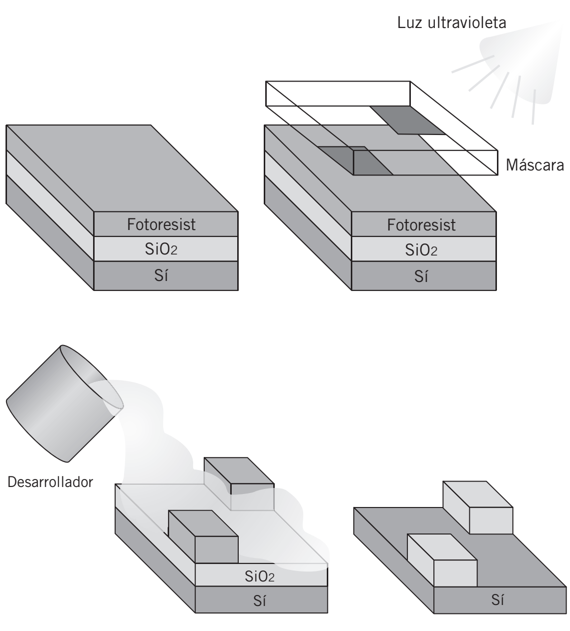

Compuestos
completados
Cesta
Baño de impregnación
Troquel de curación
Sierra


Itinerantes
Baño de
impregnación
Devanador

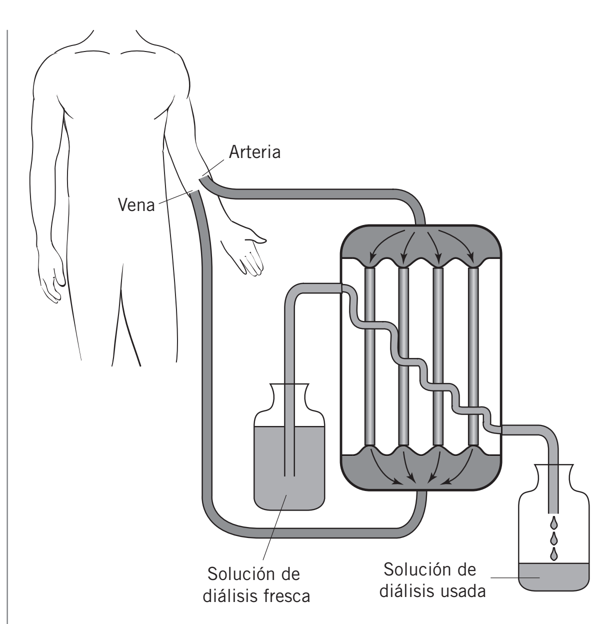

Horno
Prepreg
Carrete
de fibra
Baño de impregnación
Carrete
de tejido


Campo eléctrico


Lado p
Lado n
Zona de
depleción
+
–



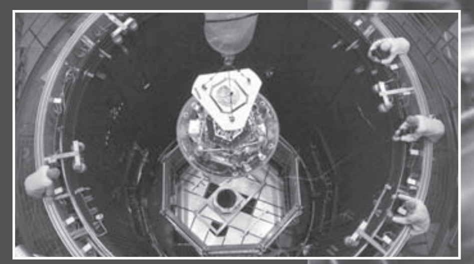
34. Figura 8-14 Fotoresist (*página 261*)



35. Figura 9-12 Diálisis (*página 286*)

1 Introducción

Imágenes de la NASA (parte inferior de izquierda a derecha): Observatorio de la Tierra de la NASA, Digital Vision/Getty Images; Shani Miller/Foto de archivo; Digital Vision/Getty Images







CONTENIDO

Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el alumno debe ser capaz de:

- Explicar por qué se debería estudiar ciencia de los materiales.
- Evaluar las propiedades deseables para aplicaciones específicas.
- Explicar el uso y las limitaciones de la evaluación heurística como los diagramas de Ashby.
- Describir el rol de la economía en la selección de materiales.
- Explicar el significado de los cuatro números cuánticos.
- Distinguir entre el enlace primario y el secundario.
- Explicar las diferencias entre enlaces iónico, metálico y covalente y determinar qué tipo de enlace se presentará en dos átomos dados (si se conocen sus electronegatividades).
- Explicar la base física para las fuerzas dipolares, el enlace de hidrógeno y las fuerzas de Van Der Waals.
- Analizar la sustentabilidad de los materiales y el impacto de la ingeniería verde en la toma de decisiones.
- Describir las propiedades fundamentales de la mayoría de los materiales.

¿Por qué estudiar Ciencia de los Materiales?

1.1 GENERALIDADES DE LA CIENCIA DE LOS MATERIALES

El mayor objetivo de la Ciencia de los Materiales es alentar a los científicos e ingenieros para tomar elecciones informadas respecto del diseño, selección y uso de materiales para aplicaciones específicas. Cuatro principios fundamentales guían el estudio de la Ciencia de los Materiales:

1. Los principios que regulan el comportamiento de los materiales están cimentados en la ciencia y son comprensibles.
2. Las propiedades de un material específico están determinadas por su estructura. El procesamiento puede alterar esa estructura en formas específicas y predecibles.
3. Las propiedades de todos los materiales cambian a través del tiempo con el uso y con la exposición a las condiciones ambientales.
4. Cuando se selecciona un material para una aplicación específica, se deben efectuar las pruebas suficientes y adecuadas para asegurar que el material se conservará idóneo para la aplicación correspondiente durante la vida razonable del producto.

El científico o el ingeniero de materiales debe:

- Comprender las propiedades asociadas con las diversas clases de materiales.
- Saber porqué existen tales propiedades y cómo se pueden alterar para que un material sea más adecuado para una aplicación determinada.
- Ser capaz de medir las propiedades importantes de los materiales y cómo impactarán el desempeño.
- Evaluar las consideraciones económicas que finalmente regulan la mayoría de los asuntos de los materiales.
- Considerar los efectos a largo plazo que producen en el ambiente el uso de un material.

¿Qué problemas impactan la selección de los materiales y el diseño?

Si usted está a punto de reemplazar un sistema de tubería de cobre, ¿cómo decide si reemplazarlo por completo con cobre de nuevo, acero inoxidable, PVC o cualquier otro material?, ¿qué hará con la tubería de cobre que está removiendo?, ¿se puede reutilizar en algún otro lugar dentro de la planta?, ¿se puede vender a un centro de reciclaje o a otra planta?, ¿necesitará enterrarlo en un basurero específico? Las respuestas ideales a estas preguntas dependen de una mezcla de propiedades físicas y químicas inherentes del material. Finalmente, las decisiones estarán reguladas por los conocimientos de la persona responsable que toma las decisiones con respecto a esas propiedades y a los factores económicos.

1.2 CONSIDERACIONES DE LAS PROPIEDADES PARA APLICACIONES ESPECÍFICAS

Para tomar una decisión informada en el diseño o la selección de un material, primero se debe saber qué propiedades son importantes para la aplicación específica, al mismo tiempo que se debe reconocer que la lista de propiedades deseadas se puede volver más extensa y más complicada según las necesidades de evolución del producto. Por ejemplo, previo a 1919, la mayoría de los automóviles no tenían parabrisas, lo cual dejaba vulnerable a los conductores respecto a la lluvia, el lodo y objetos que volaran por el camino. Cuando se seleccionó un material para fabricar los parabrisas, los diseñadores de autos pudieron elaborar una lista de propiedades deseables parecida una siguiente:

1. Debería ser transparente. Obviamente, un parabrisas a través del cual no se puede ver tendría un valor muy poco práctico.
2. Debería ser impermeable al agua. De otra forma, el auto no podría ser conducido en la lluvia.
3. Debería ser lo suficientemente fuerte para resistir una rotura al menor impacto (pequeños pedazos de grava, piedritas, etc.)
4. Deberia ser muy económico para no alterar sustancialmente el precio del auto.
5. Debería tolerar temperatura extremas, desde por debajo de cero grados en el invierno (como en Dakota del Norte) hasta los 100° F (38° C) en el verano.

La mayoría de la gente no tendría dificultad al generar esta lista y probablemente identificaría una respuesta sencilla: el vidrio. Para 1929, cerca de 90% de los nuevos automóviles contaban con vidrio. Desafortunadamente, con dificultad se completaba la lista de preguntas antes descrita, y los primeros parabrisas tuvieron problemas. Si alguna vez ha lanzado una moneda a una pecera de cristal, sabe que el vidrio refracta la luz, distorsionando la aparente posición de los objetos. Este problema fue tan significativo que algunos parabrisas terminaban por debajo del nivel de los ojos para que los conductores pudieran ver por encima del vidrio; otros venían en dos partes, así que los conductores podían abrir la parte superior y ver. El auto Franklin de 1920 que se muestra en la figura 1-1 tiene el parabrisas dividido y no tiene paneles laterales de vidrio.

En 1928, Pittsburgh Plate Glass (ahora PPG Industries) desarrolló el ***proceso Pittsburgh*** que hacía que el parabrisas fuera más barato y reducía dramáticamente la distorsión. Este proceso resultó de grupos de científicos e ingenieros en materiales que aplicaron su conocimiento de la refracción y la estructura del vidrio para diseñar un nuevo producto que podía reducir o eliminar el anterior problema.

| ***Proceso Pittsburgh*** |
Proceso para fabricar vidrio desarrollado en 1928 para reducir su costo y la distorsión.

Si la gente manejara con seguridad todo el tiempo, el vidrio sencillo hubiera sido una respuesta buena y suficiente. Lamentablemente, el vidrio tiende a quebrarse en filosas astillas al impacto. Durante los accidentes, los conductores generalmente se cortaban con estas astillas o, incluso peor, eran lanzados a través del parabrisas. Los ingenieros resolvieron este problema al crear láminas de vidrio en donde intercalaban capas de película entre estas hojas delgadas de vidrio como se muestra en la figura 1-2. Este fue el famoso vidrio de seguridad que redujo las cortaduras y las eyecciones de los pasajeros. Para 1966, el vidrio de seguridad fue obligatorio en todos los autos fabricados en Estados Unidos.



Figura 1-1 Franklin 1920 con parabrisas dividido

Cortesía de James Newell

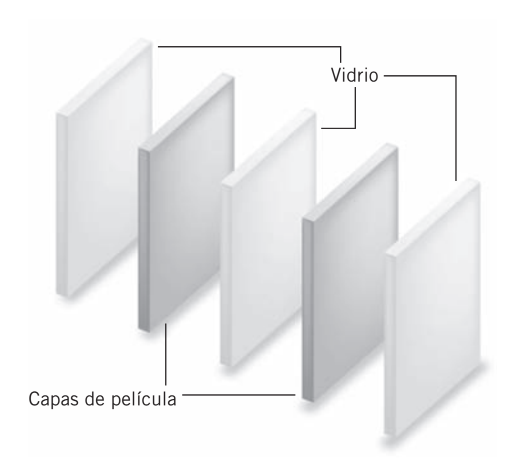


Figura 1-2 Esquema del vidrio de seguridad para parabrisas



Figura 1-3 Parabrisas curvado y polarizado en un Acura moderno

Cortesía de James Newell

Los científicos e ingenieros continuaron trabajando conjuntamente para mejorar la dureza y la calidad del vidrio, pero los fabricantes de autos les proporcionaron nuevas listas de las propiedades deseadas. Por ejemplo, los diseñadores de autos solicitaron paneles curvos de vidrio para los parabrisas y paneles laterales para mejorar la aerodinámica y la apariencia visual de los autos. Hasta 1934, el vidrio se producía en hojas planas. Los parabrisas curvos aparecieron por primera vez en 1934, pero no fue sino hasta finales de los años cincuenta que se desarrolló un proceso para hacer las ventanas laterales curvas más accesibles en precio, puesto que eran más pequeñas y menos uniformes en forma que los parabrisas. Las mejoras modernas incluyen vidrio de seguridad temperado que se rompe en fragmentos regulares para reducir el daño así como el polarizado que permite a los conductores ver mejor mientras se reduce el reflejo y proporciona algo de privacidad como en el auto de la figura 1-3.

Por cada una de las mejoras que ocurría, los científicos e ingenieros necesitaron entender qué características del vidrio resultaron en propiedades deseable e indeseables, y cómo alterar la estructura del material para mejorar su adaptabilidad para el producto. El desarrollar este entendimiento es el punto esencial de la Ciencia de los Materiales: encontrar la necesidad, elegir el material adecuado y utilizar los conocimientos de ese material para alterar sus propiedades y adaptarlo a los requerimientos de la aplicación específica, que será diferente de las otras aplicaciones y que puede cambiar con el tiempo.

Considere otro ejemplo más moderno. El transbordador de la figura 1-4 cuenta con un sistema de protección térmica para proteger a los astronautas del calor al reingresar a la atmósfera de la Tierra. Cuando se revisaron los materiales del parabrisas, se observó que debían mantener sus propiedades en un rango de temperaturas un poco más alto a los 100° F. Durante el reingreso de la nave espacial a la Tierra aquélla mantiene una velocidad de 17 000 millas por hora. En el espacio, los materiales externos de la nave rápidamente pasan de temperaturas de cerca del cero absoluto a tan altas como los 3000° F.

Las losetas cerámicas a base de sílice negro altamente avanzado cubren la mayoría de la superficie de la nave y es complementada con coberturas aislantes y una segunda capa de losetas de cerámica blanca. Estos materiales proporcionan un excelente aislamiento y son ligeros, pero no proporcionan protección completa por sí solos. Al reingresar a la atmósfera terrestre, la punta de la nave y los bordes principales de las alas experimentan más calor que las otras partes. Para estas áreas, los compuestos de carbono-carbono altamente especializados



Figura 1-4 Transbordador espacial

Imágenes de la NASA

se utilizan por su capacidad única para conducir el calor en una dirección y aislarlo en otra. Estos compuestos protegen la cabina del calor mientras lo conducen alejándolo de los bordes principales de la nave.

Este sistema de protección térmica tardó años en desarrollarse, y los científicos continuamente tratan de mejorarlo. Algunos investigadores han examinado el uso de losetas metálicas especializadas, pero debido a que su peso es mayor han limitado su aplicación. Otros científicos continúan examinando las combinaciones de cerámicas avanzadas para mejorar el sistema existente.

Ya sea que se trate de algo tan común como los parabrisas o tan avanzado como un transbordador espacial, el rol de los científicos e ingenieros de materiales es fundamentalmente el mismo: examinar las propiedades deseadas para una aplicación, elegir el mejor material disponible y aplicar su conocimiento de la estructura y procesamiento de los materiales para hacerle las mejoras necesarias. Los retos específicos varían con cada aplicación. El peso es el factor más importante que el costo en lo que respecta a un transbordador espacial ya que debe escapar de la fuerza gravitacional de la Tierra, pero mucho menos en lo que se refiere a un automóvil, el cual debe permanecer suficientemente accesible para que la gente pueda adquirirlo. El desecho y/o el reciclaje son asuntos menos importantes para el transbordador espacial ya que sólo hay unas cuantas; estos factores se vuelven importantes cuando se consideran millones de autos que actualmente circulan.

El rango de materiales disponibles es enorme, y no es práctico efectuar un análisis detallado de cada uno de los materiales posibles para cada aplicación.

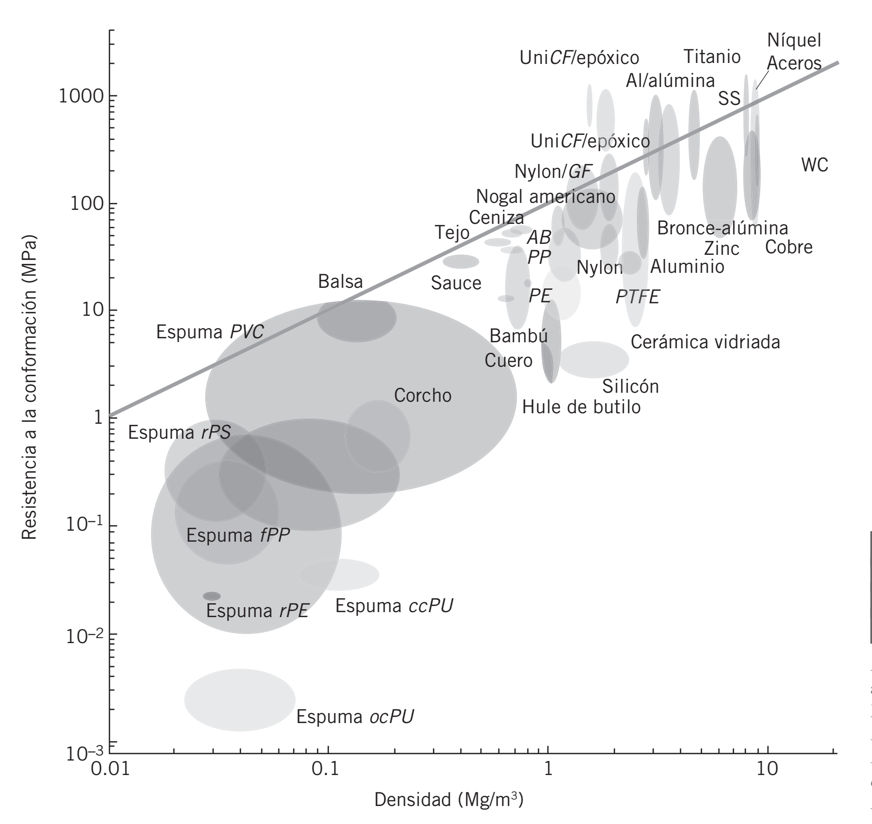


Figura 1-5 Diagrama de Ashby que relaciona la densidad con la resistencia a la conformación para varias clases de materiales

De M. Ashby y K. Jonson, Materials and Design: The Art and Science of Material Selection in Product Design. *Derechos reservados © 2002 por Elsevier Butterworth-Heinemann. Reimpreso con permiso de Elsevier Butterworth-Heinemann.*

En su lugar, los ingenieros y científicos aplican sus conocimientos de las clases de materiales junto con sencillos lineamientos, o heurísticas, para ayudar a reducir la búsqueda de mejores materiales para aplicaciones específicas. Los ***diagramas de Ashby***, como el de la figura 1-5, proporcionan un medio sencillo y rápido de ver qué tan diferentes son las clases de materiales y cómo desempeñan en términos de propiedades específicas. Como una heurística rápida para obtener una búsqueda del material adecuado, estos diagramas pueden ser invaluables, pero tienen sus limitaciones. Los diagramas de Ashby no proporcionan el dato específico de porqué una clase determinada de material supera a otra en un área específica, ni proporcionan una guía para saber cómo seleccionar entre el amplio rango de materiales dentro de una categoría determinada o brindar sugerencias respecto a cómo optimizar el desempeño de un material específico. Estos diagramas son herramientas útiles para obtener una búsqueda, pero no reemplazan el juicio de un ingeniero o un científico capacitado en ciencia de los materiales.

| ***Diagramas de Ashby*** |
La heurística usada para proporcionar un medio rápido y sencillo de observar cómo diferentes clases de materiales se desempeñan en términos de propiedades específicas.

Gran parte del resto de este libro se concentra en:

- El material a elegirse de una clase de materiales para una aplicación.
- Las explicaciones de las propiedades que influyen en el comportamiento de estos materiales y cómo medirlos.
- La examinación de las estructuras en los materiales que controlan estas propiedades.
- El análisis de las estrategias de procesamiento que pueden alterar estas estructuras y las propiedades.

1.3 IMPACTO DE LAS PROPIEDADES DE ENLACE DE LOS MATERIALES

| ***Modelo de Bohr*** | Representación clásica de la estructura atómica en la cual los electrones orbitan el núcleo cargado positivamente en distintos niveles de energía.

| ***Orbitales*** | Niveles de energía discretos en los cuales los electrones giran alrededor del núcleo de un átomo.

| ***Mecánica cuántica*** | Ciencia que regula el comportamiento de partículas extremadamente pequeñas como los electrones.

| ***Números cuánticos*** | Cuatro números utilizados para clasificar electrones individuales con base en su energía, forma y orientación de la nube, y spin.

| ***Número cuántico principal*** | Número que describe la capa interior mayor en la cual un electrón está ubicado.

| ***Segundo número cuántico*** | Número que describe la forma de la nube del electrón.

| ***Tercer número cuántico*** | Número que representa la orientación de la nube del electrón.

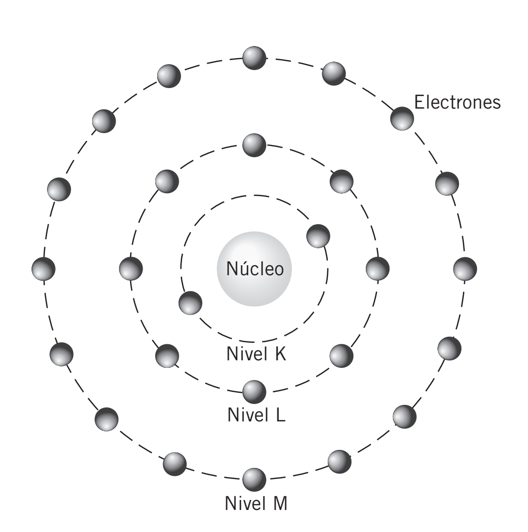
Finalmente, las propiedades de los materiales están determinadas por los tipos de átomos presentes, su orientación relativa y la naturaleza del enlace entre éstos. Es necesario revisar los principios básicos de química para comentar el rol del enlace. El ***modelo de Bohr***, figura 1-6, muestra un átomo con un núcleo positivamente cargado en el centro y los electrones orbitando en diferentes niveles de energía. Aunque es conveniente dibujar los electrones como partículas, éstos poseen propiedades de partículas y de ondas. De esta manera, es más conveniente pensar en los electrones como una “nube de electrones” en la cual el electrón estará presente en diferentes partes de la nube en diferentes momentos.

El paquete de estos niveles de energía, u ***orbitales***, con electrones sigue reglas muy específicas reguladas por una ciencia llamada ***mecánica cuántica***. Estas reglas, presentadas por primera vez por Erwin Schroedinger en los años veinte, permiten que la energía de un electrón determinado, la forma de la nube del electrón, la orientación de la nube en el espacio y el spin del electrón se caractericen por cuatro números denominados ***números cuánticos***.

El ***número cuántico principal*** (n) determina la energía del electrón. La órbita más recóndita tiene un número cuántico primario de 1, el siguiente 2 y así sucesivamente. La figura 1-6 muestra estos orbitales de forma esquemática. Más comúnmente, se asignan letras para representar los orbitales individuales. En tales casos, K corresponde a $n = 1$, L a $n = 2$ y así sucesivamente.

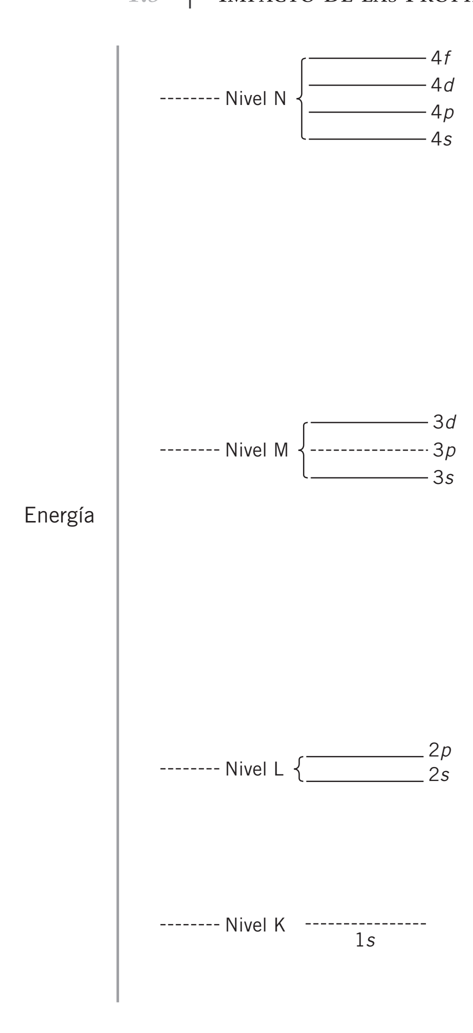
El ***segundo número cuántico*** (λ) determina la forma general de la nube de electrones. Algunos de los niveles de energía en el modelo de Bohr se dividen en subniveles con energías ligeramente diferentes y formas bastante diferentes. En el nivel n-ésimo hay subniveles n posibles. Como lo muestra la figura 1-7, sólo hay una órbita posible para la capa interior que corresponde a $n = 1$, pero dos para $n = 2$ y tres para $n = 3$. El primer subnivel ($\zeta = 0$) se llama subnivel s; el segundo ($\lambda = 1$) se llama subnivel ρ. La figura 1-7 resume la nomenclatura y los niveles de energía.

El ***tercer número cuántico*** (m_λ) indica cómo la nube de electrones se origina en el espacio. m_λ puede tener un valor íntegro (incluyendo 0) desde $-\lambda$ a $+\lambda$. Como tal, un subnivel s puede tener solamente $m_\lambda = 0$, mientras un subnivel ρ



Los electrones giran alrededor del núcleo en niveles de energía discretos. Para que un electrón cambie de niveles de energía, debe ganar o perder cantidades específicas de energía.

Figura 1-6 Modelo de Bohr de un átomo



Designaciones de suborbitales

n	1	2		3			4			
Designación del número cuántico principal	K	L		M			N			
l	0	0	1	0	1	2	0	1	2	3
Designaciones de suborbitales	1*s*	2*s*	2*p*	3*s*	3*p*	3*d*	4*s*	4*p*	4*d*	4*f*

Figura 1-7 Designaciones de suborbitales

podría tener valores m_λ de -1, 0 o $+1$. Las formas de las nubes de electrones varían con el subnivel en el que se encuentran localizadas. Las nubes de los subniveles *s* son esféricas, mientras que las de los subniveles p forman figuras de ochos alargados como se muestran en la figura 1-8.

El ***cuarto número cuántico*** (M_s) representa el ***spin*** del electrón. El spin es un concepto teórico que se deriva de los mecanismos cuánticos complejos y permite que los electrones individuales se distingan uno del otro dentro de los

| ***Cuarto número cuántico*** |
Número que representan al spin de un electrón.

| ***Spin*** |
Concepto teórico que facilita a los electrones individuales dentro de los subniveles a distinguirse uno del otro.

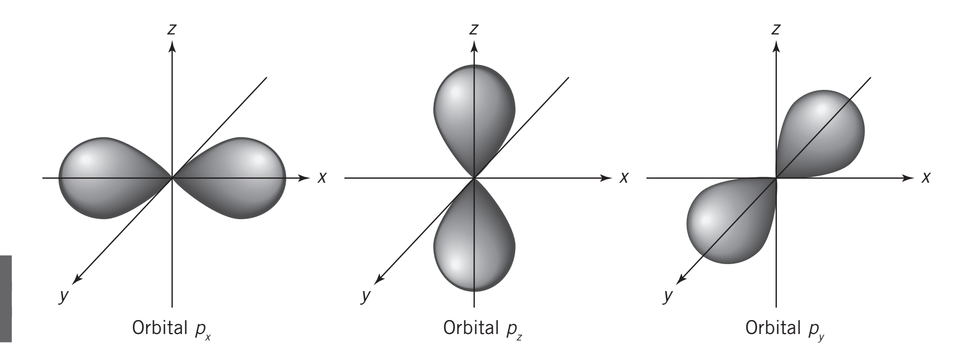


Figura 1-8 Formas de las nubes de electrones en los subniveles *p*

niveles. El cuarto número cuántico no tiene relación con los otros números cuánticos y puede tener solamente dos posibles valores:

$$M_s = +\frac{1}{2} \text{ o } -\frac{1}{2}. \tag{1.1}$$

| *Spines paralelos* | Electrones con el mismo cuarto número cuántico.

| *Spines opuestos* | Electrones con el cuarto número cuántico.

| *Principio de exclusión de Pauli* | Establece que no puede haber más de dos electrones en cualquier orbital y que los dos electrones deben tener spines opuestos.

Los electrones con el mismo valor de M_s tienen ***spines paralelos*** mientras que los que tienen valores opuestos tienen ***spines opuestos***.

Los cuartos números cuánticos permiten que cada electrón en un átomo sea caracterizado particularmente. En 1925, Wolfgang Pauli demostró que no hay dos electrones en un átomo que puedan tener el mismo juego exacto de cuatro números cuánticos. Esta observación se conoce como el ***principio de exclusión de Pauli***, y su efecto principal es que no más de dos electrones pueden caber en ningún orbital y que los dos electrones en un suborbital deben tener spines opuestos.

En general, los electrones llenan los estados de energía más bajos disponibles con dos electrones por suborbital con spines opuestos, hasta que el átomo se haya quedado sin electrones. Un átomo con todos sus electrones en los niveles de energía más bajos posibles que no violan el principio de exclusión de Pauli está en su *estado fundamental*. Cuando el átomo se altera por campos de energía o magnéticos, algunos electrones se pueden mover temporalmente a niveles de energía mayores. Esta es la base para todos los materiales electrónicos y se analiza con mucho más detalle en el capítulo 8.

Cuando los átomos interactúan entre sí, los electrones en los niveles de energía periféricos (los electrones de valencia) interactúan primero y son los más importantes para determinar el enlace entre los átomos. Cuando el nivel de energía periférica está totalmente lleno (por ejemplo, los ocho electrones *p* encontrados en los gases nobles), no hay razón termodinámica para que el átomo se enlace con un vecino. Cuando las capas no se han llenado, generalmente los átomos ganan, pierden o comparten electrones con otros átomos, proceso que sirve como la base para el enlace químico.

La interacción entre átomos es una mezcla de fuerzas de atracción y de repulsión. Los átomos que están separados casi no tienen interacción, pero mientras más se acercan, una mezcla de fuerzas de atracción y de repulsión comienza. Los electrones de valencia son repelidos por la nube de electrones con carga negativa del átomo adyacente pero son atraídos por el núcleo positivo. La naturaleza específica de la interacción entre los átomos depende del estado de los electrones de valencia y la clase de enlace que formen.

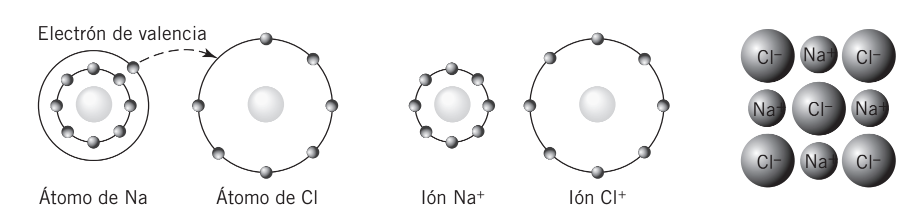


Figura 1-9 Enlace iónico en el cloruro de sodio (NaCl)

| *Enlace iónico* |
Donación de un electrón a partir de un material electropositivo a un material electronegativo adyacente.

El ***enlace iónico*** es conceptualmente la clase más simple de enlace entre átomos. Un material electropositivo, que tiene uno o más electrones extra más allá de su último subnivel completado, se acerca a un material electronegativo al que le hace falta uno o más electrones que no lograron el relleno de su subnivel periférico. Las fuerzas electroestáticas favorecen energéticamente al material electropositivo para donar su electrón de valencia (o electrones) al material electronegativo. Los metales de los Grupos I y II de la tabla periódica frecuentemente forman enlaces iónicos con los halógenos del Grupo VII. Los halógenos son todos un electrón corto que no llegan a tener ocho electrones de valencia, así que fácilmente adoptan al electrón extra del metal. Los compuestos como el NaCl y el CaF_2 son materiales clásicos de enlace iónico. La figura 1-9 representa una muestra esquemática del enlace iónico en el cloruro de sodio.

Para cualquiera de los dos átomos, existe una distancia óptima que representa la energía potencial mínima. Considere dos átomos de hidrógeno, cada uno con un electrón de valencia impar en su subnivel s. Cuando los dos átomos se encuentran separados, no interactúan de ninguna manera significativa, sino como lo muestra la figura 1-10, las fuerzas de atracción entre los átomos se incrementan en relación con las fuerzas de repulsión, alcanzando un máximo a una distancia de 0.074 nm. El estado energético más favorable para los átomos sucede cuando la energía potencial es mínima. En este caso, la mínima sucede a −436 kJ. Como resultado, los dos átomos de hidrógeno formarán una molécula de H_2 con una energía de enlace de −436 kJ.

A diferencia de los electrones donados en enlaces iónicos, los electrones en enlaces covalentes pueden estar ubicados en cualquier punto alrededor de los dos núcleos, pero es más común encontrarlos entre ellos, como se muestra en la figura 1-11. La existencia de energía mínima proporciona la base para el enlace covalente, en la que los electrones se comparten.

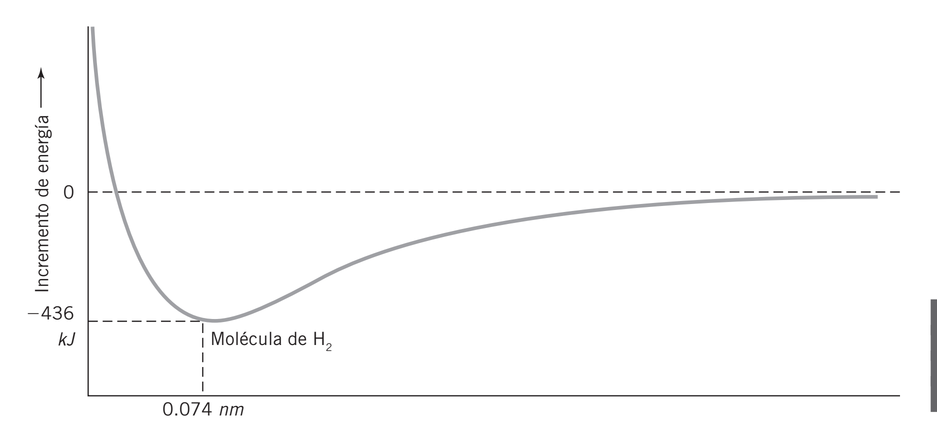


Figura 1-10 Energía potencial contra la distancia atómica para dos átomos de hidrógeno



Figura 1-11 Nube de electrones del enlace covalente no polar

Cortesía de James Newell

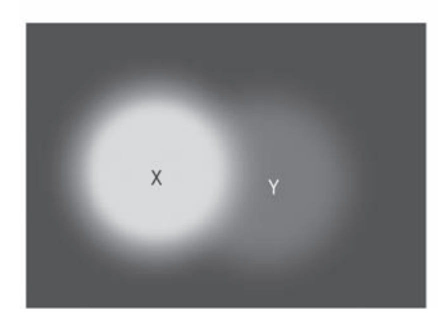


Figura 1-12 Nube de electrones alrededor de un enlace covalente polar polar. (El átomo más electronegativo es el de la izquierda.)

Cortesía de James Newell

| *No polar* | Interacción en la cual la densidad del electrón alrededor de los átomos adyacentes es simétrica.

| *Polar* | Interacción en la cual la densidad del electrón alrededor de los átomos adyacentes es asimétrica.

| *Electronegatividad* | Capacidad de un átomo en enlace covalente de atraer electrones a sí mismo.

Cuando moléculas idénticas (como dos hidrógenos) se enlazan, la probabilidad es exactamente igual de hallar un electrón de enlace cerca de una molécula como de otra, y el enlace se llama ***no polar***. Sin embargo, cuando moléculas diferentes interactúan, es más probable que una tenga alguna clase de afinidad mayor para los electrones que la otra. Como resultado, la densidad del electrón alrededor de los átomos será asimétrica, y el enlace se conoce como ***polar***. La densidad del electrón para un enlace polar se ilustra en la figura 1-12.

La capacidad de un átomo para atraer electrones a sí mismo en un enlace covalente se conoce como ***electronegatividad***. El flúor (hasta arriba del Grupo VII) es el más electronegativo de todos los elementos y tiene asignado un valor de electronegatividad de 4.0. El cesio (en el Grupo I) es el menos electronegativo y tiene asignado un valor de 0.7. La tabla 1-1 resume los valores de electronegatividad de muchos materiales.

La cantidad de polaridad en un enlace covalente está directamente relacionada con la diferencia en electronegatividades entre los átomos. Cuando la diferencia es grande (como en H—F), el enlace será altamente polar, pero cuando la diferencia es pequeña (como en C—H), el enlace será sólo ligeramente

Tabla 1-1 Valores de electronegatividad para los elementos comunes

Valores de electronegatividad						
H 2.1						
Li 1.0	Be 1.5	B 2.0	C 2.5	N 3.0	O 3.5	F 4.0
Na 0.9	Mg 1.2	Al 1.5	Si 1.8	P 2.1	S 2.5	Cl 3.0
k 0.8	Ca 1.0	Sc 1.3	Ge 1.8	As 2.0	Se 2.4	Br 2.8
Rb 0.8	Sr 1.0	Y 1.2	Sn 1.8	Sb 1.9	Te 2.1	I 2.5
Cs 0.7	Ba 0.9	La 1.0	Pb 1.9	Bi 1.9	Po 2.0	At 2.2

polar. La polaridad en un enlace covalente está a menudo considerada como un carácter parcialmente iónico del enlace. Un enlace altamente polar tiene electrones que pasan significativamente más tiempo cerca del átomo electronegativo, muy parecido a un enlace iónico. Como resultado, el caracterizar un enlace como iónico o covalente es realmente una simplificación excesiva. La mayoría de los enlaces reales tienen características iónicas y covalentes. La diferencia en la electronegatividad corresponde directamente al carácter porcentual iónico del enlace, como se muestra en la figura 1-13.

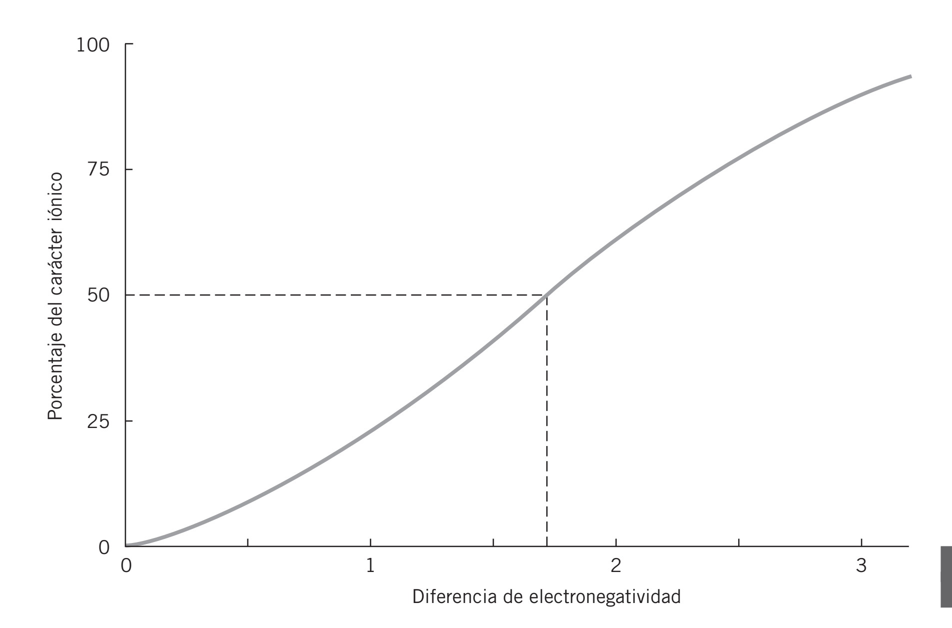


Figura 1-13 Porcentaje del carácter iónico

Ejemplo 1-1

Determinar qué tan iónicos serían los enlaces entre los siguientes átomos:

a) Sodio y cloro
b) Carbono y nitrógeno
c) Potasio y azufre

SOLUCIÓN

a) La electronegatividad del sodio (Na) es de 0.9 y del cloro (Cl) es de 3.0, de acuerdo con la tabla 1-1. La diferencia es $3.0 - 0.9 = 2.1$, la cual es aproximadamente 68% iónica.
b) La electronegatividad del carbono (C) es de 2.5 y del nitrógeno es de 3.0. La diferencia es $3 - 2.5 = 0.5$, la cual corresponde a aproximadamente 10% iónica (90% covalente).
c) La electronegatividad del potasio (K) es de 0.8 y del sulfuro es de 2.5. La diferencia es $2.5 - 0.8 = 1.7$, la cual corresponde a 50% iónica.

Los enlaces iónicos y covalentes manejan la interacción entre átomos, pero las moléculas formadas por átomos enlazados también interactúan una con otra. Estas interacciones, referidas como enlaces secundarios, pueden tener influencia significativa sobre el comportamiento de los sólidos. Las moléculas polares en una estructura cristalina se alinean para que el polo positivo de una molécula esté más cercano al polo negativo de la molécula adyacente, como se muestra en la figura 1-14. Como resultado, se forma una interacción electroestática entre las moléculas conocida como ***fuerza dipolar***. Estas interacciones crean fuerza adicional en el material y elevan el punto de ebullición de los líquidos.

| *Fuerza dipolar* |
Interacción electrostática entre moléculas resultantes de la alineación de las cargas.

El caso más extremo de fuerzas dipolares involucra un átomo de hidrógeno interactuando con un átomo de flúor (F), de oxígeno (O) o de nitrógeno (N) desde una molécula adyacente. En tal caso, el átomo de hidrógeno de una molécula es fuertemente atraído hacia el átomo electronegativo en la molécula adyacente, resultando en un ***enlace de hidrógeno***. La fuerza de un enlace de hidrógeno es más fuerte que otras fuerzas dipolares porque la diferencia electronegativa entre el hidrógeno y el F, el O o el N es grande debida a que el tamaño pequeño de la molécula de hidrógeno le permite al átomo electronegativo acercarse mucho al átomo de hidrógeno.

| *Enlace de hidrógeno* |
Interacción dipolar fuerte resultante entre un átomo de hidrógeno y un átomo altamente electronegativo.

El tipo final de enlace secundario sucede en todas las sustancias y se incrementa con el peso molecular. Estas fuerzas, llamadas *fuerzas de dispersión* o *fuerzas de Van Der Waals,* son causadas por interacciones dipolares temporales que resultan de variaciones de concentración momentáneas en las nubes de electrones de moléculas adyacentes. Por ejemplo, dos moléculas adyacentes de H_2 no tienen polaridad pero, como se muestra en la figura 1-15, en un momento dado en el tiempo, los electrones de la molécula 1A pueden estar en el lado izquierdo, mientras que aquellos en 2A también están en el lado izquierdo. Como resultado, el lado derecho de la molécula 1A tiene una polaridad positiva efectiva momentánea (en el instante antes de que el electrón regrese) que es arrojada a la polaridad negativa momentánea desde la molécula 2A. Aunque estas interacciones son extremadamente breves, suceden una y otra vez. Las moléculas más grandes tienen más oportunidades para que estas interacciones sucedan.

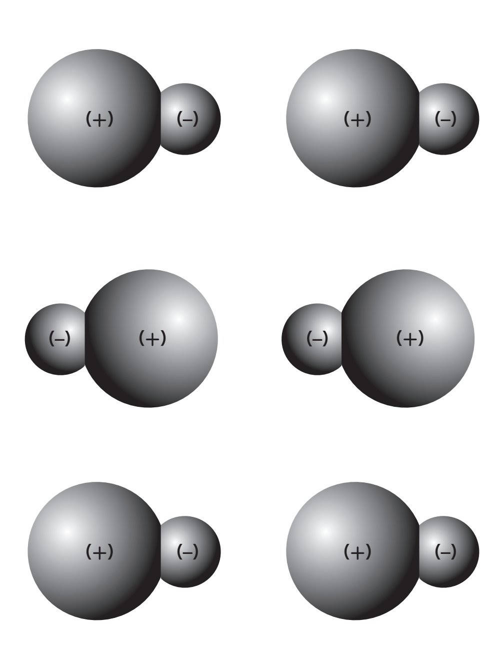


Figura 1-14 Ilustración de las fuerzas dipolares

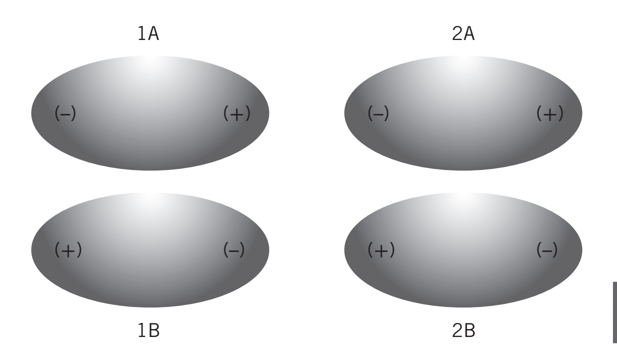


Figura 1-15 Fuerzas de dispersión entre las moléculas de H_2 adyacentes.

La última clase significativa de enlace que impacta mayormente las propiedades de los materiales es específica para los metales y se llama ***enlace metálico***. Cuando dos átomos metálicos se enlazan, la diferencia en electronegatividad va de muy poca a ninguna, así que claramente el enlace no es iónico. Sin embargo, los electrones de valencia en los metales se comportan como un mar de electrones deslocalizado en el que los electrones individuales fluyen fácilmente de átomo en átomo, como se muestra en la figura 1-16. Este comportamiento permite la alta conductividad de los metales.

| ***Enlace metálico*** |
Un metal al compartir los electrones entre átomos obtiene excelentes propiedades de conductividad, ya que los electrones están libres para moverse respecto a la nube de electrones alrededor de los átomos.

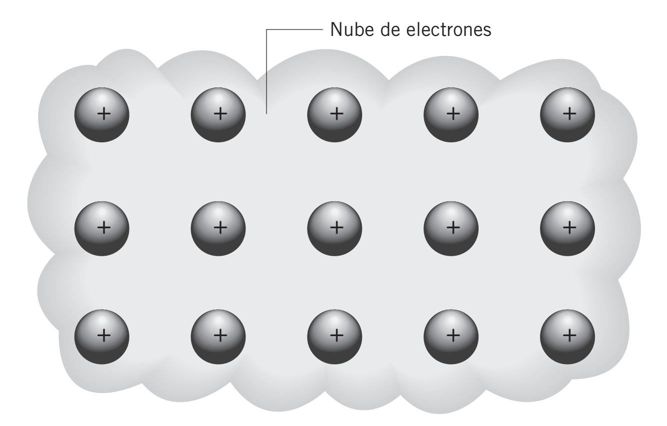


Figura 1-16 Representación esquemática de la nube de electrones deslocalizada en los metales

1.4 CAMBIOS DE LAS PROPIEDADES A TRAVÉS DEL TIEMPO

El análisis previo sobre la selección de materiales apropiados procedió como si todos los materiales tuvieran un solo juego de propiedades inherentes que permanecen constantes durante la vida útil de los materiales. Incluso el diagrama de Ashby presentado en la figura 1-5 comparó materiales "frescos". En la realidad, sin embargo, las propiedades de los materiales cambian a través del tiempo por una variedad de motivos. Fatiga, corrosión, separación química, erosión y una variedad de otros mecanismos pueden reducir el desempeño de un material. Cuando los científicos seleccionan un material para su uso en una aplicación específica, deben tener gran cuidado de asegurarse que las propiedades importantes del material permanecerán aceptables a través de la vida de la aplicación esperada. Cómo cambian las propiedades a través del

tiempo varía con la clase de material y con el medio ambiente al que el material es expuesto. Los metales pueden simplemente oxidarse o corroerse, los polímeros pueden encogerse o perder algo de su fuerza y los compuestos se pueden deslaminar. En capítulos posteriores se proporcionan detalles sobre cómo las propiedades cambian con el tiempo y el medio ambiente para cada clase de material. Por ahora, tome en cuenta que ninguna selección se puede hacer sin el entendimiento de la importancia de estos cambios.

1.5 IMPACTO DE LA ECONOMÍA EN LA TOMA DE DECISIONES

La selección de materiales no se basa exclusivamente por la mejor combinación de propiedades químicas y físicas. El costo es casi siempre un factor principal en la selección de los materiales. El identificar las alternativas más económicas es complicado debido al hecho de que no todos los gastos ocurren una sola vez. Es mejor seleccionar un material más durable que sea más caro al principio pero durará más tiempo o, ¿sería mejor comprar una alternativa más barata aunque se necesite reemplazar más frecuentemente? El punto es más complicado por el hecho de que el dinero obtenido ahora es más redituable que el dinero en el futuro porque el dinero que no se gaste hoy podría ser invertido. El gastar dinero ahora le cuesta a usted no sólo el dinero, sino todo el interés que podría haber ganado por esperar a gastarlo.

Por ejemplo, si una empresa decide esperar un año para reemplazar alguna tubería de cobre que costaría $1 000 000 y en su lugar invierte ese dinero para el año en una cuenta que pagará 5% de interés, la empresa tendría $1 050 000 después de un año. El concepto de que una cantidad de dinero futuro es menos redituable que la misma cantidad de dinero en el presente por el interés que se podría haber ganado se llama ***valor del dinero en el tiempo***. El ***interés*** es esencialmente un pago de renta por el uso del dinero. Cuando deposita su dinero en el banco durante un año, éste le paga una tasa de interés establecida como renta por ese dinero, mismo que el banco invierte o presta a otros clientes a una tasa de interés más alta.

| ***Valor del dinero en el tiempo*** |
El concepto de que el dinero futuro vale menos que el dinero en el presente debido al interés que se pudo haber ahorrado.

| ***Interés*** |
Renta pagada al dueño del dinero por el uso temporal de ese dinero.

Aunque una consideración detallada sobre el cálculo de economía de ingeniería está más allá del alcance de este texto, el rol de los factores económicos en la selección de materiales aparecerá a través de los varios capítulos de este texto. Lo problemas de tareas en capítulos subsecuentes que involucran los factores económicos en la toma de decisiones estarán marcados con el símbolo $.

1.6 SUSTENTABILIDAD E INGENIERÍA VERDE

Históricamente, el análisis que determinó la selección de materiales óptimos para una aplicación dada terminó después de la vida útil del producto. Si se esperaba que un motor durara 20 años, los materiales en ese motor tenían que mantener propiedades útiles durante ese tiempo con la mejor economía posible. Se daba poca importancia a lo que pasaría con el motor cuando hubiera terminado su vida útil, con la posible excepción de factorización a cualquier costo asociado con deshacerse de él. Los materiales utilizados eran arrojados en basureros o en vías fluviales y olvidados.

A finales de los años noventa, la mayoría de los expertos aceptaban el argumento de que muchos hechos humanos estaban teniendo un impacto perjudicial significativo sobre el medio ambiente. La ética y el autointerés demandaban que los desarrollos tecnológicos continuaran de una manera que fuera más benéfica

para la sociedad y el medio ambiente. El Reporte Brundtland de 1987 define ***sustentabilidad*** como “cumplir con las necesidades de la presente generación sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones de cumplir sus necesidades”.[1] Desde la perspectiva de la ciencia de los materiales, el diseño de la sustentabilidad incluye diversos puntos clave:

| *Sustentabilidad* |
Periodo en el que un material permanecerá adecuado para uso.

- Examinar métodos de conservación de energía y recursos acuíferos.
- Búsqueda de oportunidades para reutilizar o reciclar los materiales existentes.
- La selección de recursos renovables cuando sea práctico.
- La consideración del cese de uso de los materiales (basureros específicos, reciclaje, etc.) como parte del proceso del diseño.

Estos asuntos impactan directamente en el diseño y la selección de materiales. ¿Existe alguna forma de producir el mismo material con menor consumo de energía o menos desperdicio? ¿Los recursos renovables se pueden utilizar en su lugar? ¿Puede el material reutilizarse o reciclarse cuando se haya logrado su cometido, o se debe desechar en un basurero específico?

La ruta tomada por un material desde su formación inicial hasta su último desecho se llama ***ciclo de vida***. Todos los productos comienzan con la recolección de materias primas, seguidas por su transformación a productos a través de series de pasos de fabricación y finalmente su venta al usuario. Históricamente, las metas de un científico de materiales terminaban ahí, pero el producto por sí mismo no estaba terminado. Después de que la vida útil del material termina, éste debe ser reciclado, reutilizado o descartado. El ciclo de vida de un material incluye el tiempo total desde la recolección de la materia prima hasta el último desecho del producto. El American Chemistry Council (además de otras sociedades profesionales) ha reconocido la responsabilidad de los diseñadores industriales para considerar el ciclo de vida total del material en sus diseños.

| *Ciclo de vida* |
El curso que toma un material desde su formación inicial hasta su desecho final.

Para algunas consideraciones del ciclo de vida, un análisis cualitativo de selecciones y procesos de materiales puede ser suficiente para reducir el impacto ambiental de las decisiones. Eliminar los compuestos que contengan cianuro de los contenedores tratados a presión está dentro de esta categoría. El método más detallado de análisis del ciclo de vida de un material involucra el desarrollo de un ***análisis del ciclo de vida*** (LCA por sus siglas en inglés). El análisis comienza al definir limitaciones, las cuales son el nivel de detalle que incluirá el examen. Dentro de esas limitaciones se desarrolla un inventario detallado de entradas y salidas. Después, se genera una lista que especifica los materiales usados y emitidos. Finalmente, se analiza la lista para buscar modificaciones de diseño que podrían reducir emisiones y desperdicio. La figura 1-17 muestra una representación esquemática de un ciclo de vida típico.

| *Análisis del ciclo de vida (LCA)* |
El método más detallado de analizar el ciclo de vida de un material.

Con el propósito de reducir las consecuencias dañinas de producción, los científicos e ingenieros están reexaminando productos y procesos para encontrar más métodos benignos de fabricación, utilización, reutilización y deshecho. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en Inglés) ha apoyado un movimiento hacia la ***ingeniería verde***, el cual se define como “el diseño, la comercialización y la utilización de procesos y productos que sean factibles y económicos, al mismo tiempo que minimicen la generación de contaminación en el lugar de origen y los riesgos a la salud humana y el medio ambiente”.[2] Se han establecido nueve principios de ingeniería verde:

| *Ingeniería verde* |
Movimiento que apoya el incremento en el conocimiento y prevención de los peligros ambientales causados durante la producción, uso y desecho de los productos.

1. Procesos y productos de ingeniería holísticos ,uso de análisis de sistemas e integración de herramientas de valoración en impacto ambiental.

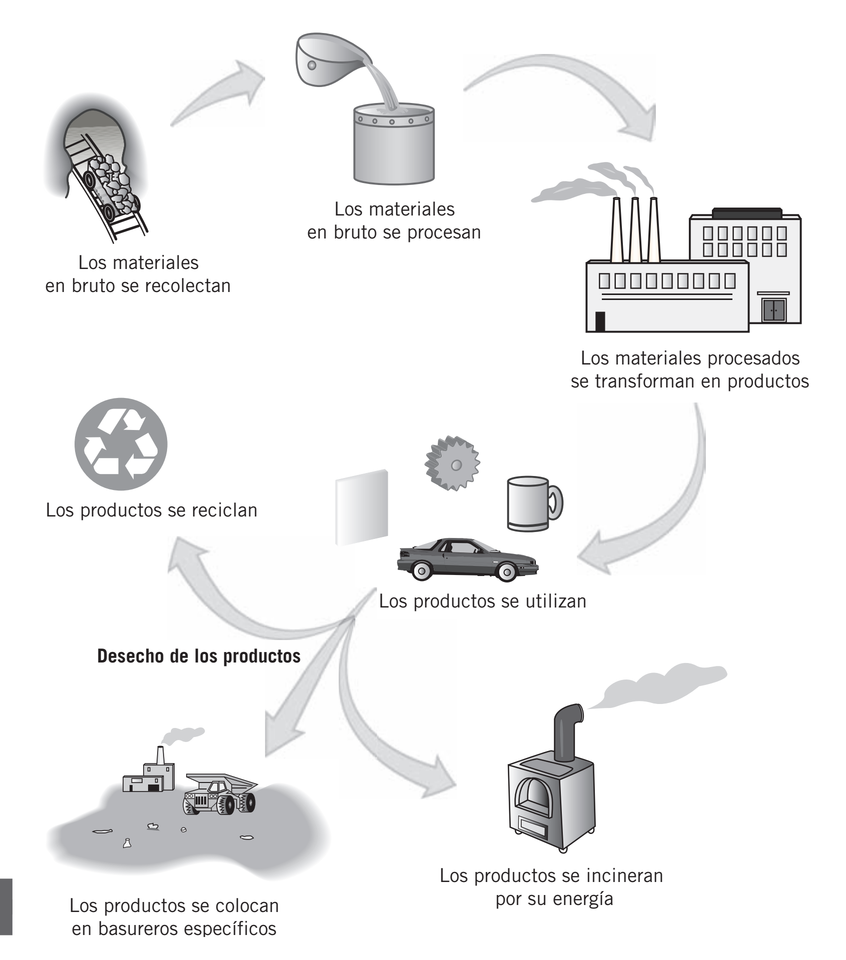


Figura 1-17 Esquemática general del ciclo de vida

2. Conservar y mejorar ecosistemas naturales mientras se protege la salud y el bienestar humano.
3. Uso de ciclos de vida pensados en todas las actividades de ingeniería.
4. Asegurarse que todas las entradas y salidas de materiales y balance de energía sean inherentemente seguros y benignos como sea posible.
5. Minimizar el agotamiento de los recursos naturales.
6. Esforzarse para prevenir el desperdicio.
7. Desarrollar y aplicar soluciones de ingeniería mientras se tenga conocimiento de la geografía, las aspiraciones y la cultura locales.
8. Cultivar soluciones de ingeniería más allá de las tecnologías actuales o dominantes; mejorar, innovar e inventar (tecnologías) para lograr la sustentabilidad.
9. Comunidades e inversionistas activamente comprometidos con el desarrollo de las soluciones de ingeniería.

Estos principios impactan directamente al diseño y a la selección de materiales apropiados para aplicaciones dadas y deberán considerarse dentro del proceso de toma de decisiones. En este texto, los problemas de tareas que involucren un aspecto de ingeniería verde estarán marcados con el símbolo .

¿Qué opciones están disponibles?

1.7 CLASES DE MATERIALES

Las propiedades de los materiales dependen de los átomos presentes, el enlace entre los átomos y los arreglos tridimensionales de los átomos dentro del material. Los tipos y arreglos de los átomos ayudan a clasificar los materiales en polímeros, metales, compuestos, cerámicas o carbono como se muestra en la tabla 1-2. Los materiales también se pueden clasificar con base en aplicaciones específicas como materiales electrónicos y biomateriales.

Tabla 1-2 Clases de materiales

Material	*Definición*	*Aplicación*
Metales	Categoría de elementos electropositivos que normalmente tienen una superficie brillante, en general son buenos conductores de calor y electricidad, y pueden ser derretidos o fusionados, cortados en hojas delgadas o convertidos en alambres.	*Cortesía de James Newell*
Polímeros	Compuestos naturales o sintéticos consistentes de moléculas grandes hechas de una serie vinculada de monómeros simples repetidos enlazados de forma covalente.	*Cortesía de James Newell*
Cerámicas	Cualquiera de varios materiales duros, frágiles y resistentes al calor y a la corrosión hechos típicamente de elementos metálicos combinados con oxígeno o carbono, nitrógeno o sulfuro. La mayoría de las cerámicas son cristalinas y son malas conductoras de electricidad, aunque las recién descubiertas cerámicas de óxido de cobre son superconductoras a bajas temperaturas.	*Cortesía de James Newell*
Compuestos	Materiales complejos como la madera o la fibra de vidrio, en las que dos o más sustancias distintas y estructuralmente complementarias, en especial metales, cerámicas, vidrios y polímeros, se combinan para producir propiedades estructurales o funcionales que no están presentes en ningún componente individual.	*Cortesía de James Newell*

| *Polímeros* |
Cadenas de moléculas enlazadas covalentemente con unidades monómeras pequeñas repetidas de extremo a extremo.

Los ***polímeros*** son cadenas de moléculas enlazadas covalentemente con las mismas unidades (meros) repetidas una y otra vez. La gran mayoría de polímeros tienen carbono como el átomo primario en la cadena, con hidrógeno, oxígeno, más carbono, nitrógeno y/o flúor unido a los lados. La figura 1-18 muestra la tabla periódica con elementos resaltados comúnmente encontrados en los polímeros. El plástico se ha convertido en un término genérico de los polímeros, pero muchos materiales naturales también son poliméricos, incluyendo las polisacarosas (celulosa y almidones), hule, proteínas en el cabello, la lana y la seda y ácidos nucleicos (ARN y ADN). Debido a que existen tantas clases de polímeros, sus propiedades varían ampliamente. El polietileno es comparativamente débil y con él se fabrican bolsas de producción barata utilizadas en las tiendas de abarrotes, mientras que otro polímeros como Kevlar© (poli parafenileno tereftalamida) y Zylon© (poli parafenileno benzobisoxasol) se utilizan como fibras balísticas en chalecos antibalas como el que se muestra en la figura 1-19.

| *Termoplástico* |
Polímero con un punto de fusión bajo debido a la falta de enlace covalente entre las cadenas adyacentes. Tales polímeros se pueden derretir repetidamente y ser reformados.

| *Plásticos termoestables* |
Polímero que no puede ser derretido repetidamente y reformado ya que tiene un fuerte enlace covalente entre cadenas.

Muchos polímeros son flexibles y de peso ligero, haciéndolos materiales ideales para aplicaciones en donde no se requiere mayor fuerza. Los polímeros se clasifican por el hecho de que se pueden volver a derretir o reformar. Los polímeros ***termoplásticos*** tienen puntos de derretimiento bajos debido a la falta de enlace entre las cadenas adyacentes y pueden ser repetidamente vueltos a derretir y a reformar. Los polímeros termoplásticos son fácilmente reciclados, pero tienen menor fuerza que muchos otros materiales. Los materiales ***termoestables*** tienen un enlace considerable entre cadenas, lo cual los hace más fuertes que los termoplásticos pero también son más difíciles de reciclar.

| *Metales* |
Materiales que poseen átomos que comparten electrones deslocalizados.

Los ***metales*** son materiales cuyos átomos comparten electrones deslocalizados, de tal forma que cualquier electrón dado es igualmente capaz de ser asociado con un gran número de átomos como se muestra en la figura 1-20. Este enlace metálico da a los metales conductividad electrónica excepcional porque los electrones son libres para flotar a través de una amplia nube de electrones alrededor de los átomos. Los metales tienen fuerza excepcional pero se les puede dar forma, lo cual los hace útiles para la construcción. Los metales son opacos y tienen una superficie brillante cuando son pulidos.

Tabla periódica de los elementos

■ = comúnmente encontrados en polímeros

	IA 1	IIA 2	IIIB 3	IVB 4	VB 5	VIB 6	VIIB 7	VIIIB 8	VIIIB 9	VIIIB 10	IB 11	IIB 12	IIIA 13	IVA 14	VA 15	VIA 16	VIIA 17	VIIIA 18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac**	104 Unq	105 Unp	106 Unh	107 Uns	108 Uno	109 Une	110 Uun	111 Uuu							

6	58 Ce*	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
7	90 Th**	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Figura 1-18 Elementos comúnmente encontrados en polímeros



Figura 1-19 Chaleco antibalas fabricado con Kevlar®

Cortesía de James Newell

Tabla periódica de los elementos

■ = metales

	IA 1	IIA 2	IIIB 3	IVB 4	VB 5	VIB 6	VIIB 7	VIIIB 8	VIIIB 9	VIIIB 10	IB 11	IIB 12	IIIA 13	IVA 14	VA 15	VIA 16	VIIA 17	VIIIA 18
1	1 H																	2 He
2	3 Li ■	4 Be ■											5 B ■	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na ■	12 Mg ■											13 Al ■	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K ■	20 Ca ■	21 Sc ■	22 Ti ■	23 V ■	24 Cr ■	25 Mn ■	26 Fe ■	27 Co ■	28 Ni ■	29 Cu ■	30 Zn ■	31 Ga ■	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb ■	38 Sr ■	39 Y ■	40 Zr ■	41 Nb ■	42 Mo ■	43 Tc ■	44 Ru ■	45 Rh ■	46 Pd ■	47 Ag ■	48 Cd ■	49 In ■	50 Sn ■	51 Sb ■	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs ■	56 Ba ■	57 La* ■	72 Hf ■	73 Ta ■	74 W ■	75 Re ■	76 Os ■	77 Ir ■	78 Pt ■	79 Au ■	80 Hg ■	81 Tl ■	82 Pb ■	83 Bi ■	84 Po ■	85 At	86 Rn
7	87 Fr ■	88 Ra ■	89 Ac** ■	104 Unq ■	105 Unp ■	106 Unh ■	107 Uns ■	108 Uno ■	109 Une ■	110 Uun ■	111 Uuu ■							

6	58 Ce* ■	59 Pr ■	60 Nd ■	61 Pm ■	62 Sm ■	63 Eu ■	64 Gd ■	65 Tb ■	66 Dy ■	67 Ho ■	68 Er ■	69 Tm ■	70 Yb ■	71 Lu ■
7	90 Th** ■	91 Pa ■	92 U ■	93 Np ■	94 Pu ■	95 Am ■	96 Cm ■	97 Bk ■	98 Cf ■	99 Es ■	100 Fm ■	101 Md ■	102 No ■	103 Lr ■

Figura 1-20 Elementos clasificados como metales

La mayoría de los metales se encuentran en la naturaleza como óxidos de metal, los cuales deben ser refinados para producir los metales puros. Los metales (o metales y no metales) frecuentemente se mezclan para formar ***aleaciones***, las cuales dan capacidad al material para lograr un mayor rango de

| ***Aleaciones*** |
Mezcla de dos o más metales.

propiedades. Las aleaciones comunes incluyen acero (hierro y carbono), latón (cobre y zinc) y bronce (cobre y estaño). El aluminio utilizado en los bordes de las latas de aluminio es, de hecho, una aleación de aluminio y magnesio.

Los ***compuestos*** son mezclas de dos materiales en los que cada material continúa existiendo en distintas fases. La fibra de vidrio utilizada para el aislamiento en la mayoría de las casas es un compuesto de fibra de vidrio encapsulado en una matriz polimérica. Las tres clases principales de compuestos incluyen los granulosos, los reforzados con fibra y los laminares. Los ***compuestos granulosos*** contienen un gran número de partículas gruesas, como la mezcla de grava y cemento que se usa en el concreto. Refuerzan propiedades de dureza o resistencia al desgaste más que la fuerza. En los ***compuestos reforzados con fibra***, el material de la matriz exterior orienta a las fibras y transfiere cualquier carga aplicada a las fibras más fuertes y frágiles. Las aplicaciones de los compuestos reforzados con fibra van desde los compuestos reforzados con fibra de silicio-carburo utilizados en los motores de aviones de caza avanzados hasta las más mundanas y antiguas aplicaciones, incluyendo el uso de paja en los ladrillos. Los ***compuestos laminares*** consisten en la alternación de capas de diferentes materiales enlazados. El chapeado es un compuesto laminar que consiste de capas de chapas de madera unidas con capas epóxicas entre ellas. Sin importar la clase, los compuestos ofrecen la oportunidad de unir dos materiales para formar un nuevo material con propiedades que ningún material de origen podría lograr por sí solo.

Las ***cerámicas*** son compuestos que contienen átomos metálicos unidos con productos no metálicos, más frecuentemente oxígeno, nitrógeno o carbono. Los óxidos de metal entran en la categoría, pero también lo hacen los cementos y vidrios. El fuerte enlace iónico entre los átomos hacen de los materiales de cerámica excelentes aisladores electrónicos y resistentes a la erosión química. Las propiedades de las cerámicas varían, pero la mayoría son fuertes y duras aunque un poco frágiles. Hay excepciones. Las cerámicas modernas de alto desempeño utilizadas en las armaduras corporales ciertamente no son frágiles, mientras que otras cerámicas tramadas despliegan superconductividad. A pesar de la creciente presencia en los mercados de materiales de alto desempeño, los materiales de cerámica dominantes en el uso industrial continúan siendo los vidrios, ladrillos, abrasivos y cementos. Debido a la característica que define a los materiales de cerámica es una mezcla de metales y no metales, los átomos de toda la tabla periódica se encuentran en las cerámicas.

Los materiales de carbono incluyen las formas naturales de carbono (***grafito*** y ***diamante***) y también ***fibras de carbono, nanotubos de carbono*** y ***fullerenos***. El grafito consta de seis anillos de carbono aromáticos enlazados en planos. Los fuertes enlaces covalentes en estos anillos aromáticos hacen a los planos extremadamente fuertes pero sólo las interacciones de Van Der Waals débiles conectan los planos, haciendo fácil para éstos deslizarse entre sí. Todo el mundo conoce el uso del grafito en los lápices, pero también sirve como material aislante en los reactores nucleares. Similarmente, los diamantes son mejor conocidos por su uso en la joyería, pero tienen importancia comercial debido a su dureza excepcional. El desarrollo de los procesos para la producción de diamantes sintéticos ha convertido el uso industrial del diamante en algo más rentable.

Las fibras de carbono, los nanotubos de carbono y los fullerenos son desarrollos más recientes del carbono. Las fibras de carbono se hacen al convertir una fibra precursora (generalmente brea o poliacrilonitrilo) en una fibra de carbono básicamente aromática que se acerca al grafito sintético. Estas fibras altamente ordenadas se utilizan en una variedad de aplicaciones, desde los

| *Compuestos* |
Material formado mediante la mezcla de dos materiales en distintas fases causando un nuevo material con diferentes propiedades que cualquiera de los originales.

| *Compuestos granulosos* |
Compuestos que contienen grandes números de partículas gruesas, como el cemento y la grava que se encuentran en el concreto.

| *Compuesto reforzado con fibra* |
Un compuesto en el cual el único material forma la matriz exterior y transfiere cualquier carga aplicada a las fibras más fuertes y más frágiles.

| *Compuestos laminares* |
Compuestos hechos mediante la alteración de las capas de materiales diferentes.

| *Cerámicas* |
Compuestos que contienen átomos metálicos enlazados a átomos no metálicos como oxígeno, carbono o nitrógeno.

| *Grafito* |
Material del carbono alotrópico consistente de seis anillos de carbono aromático enlazados en planos, permitiendo la fácil incidencia de deslizamiento entre los planos.

| *Diamante* |
Forma altamente cristalina de carbono alotrópico que es el material natural más duro conocido.

| *Fibras de carbono* |
Forma de carbono hecha por convertir una fibra precursora en una fibra totalmente aromática con propiedades mecánicas excepcionales.

| *Nanotubos de carbono* |
Tubos sintéticos de carbono formados al doblar una lámina plana de grafeno sobre otra.

| *Fullerenos* |
Formas alotrópicas de carbono hechas de una red de 60 átomos de carbono enlazadas en forma de pelota de fútbol. También conocidas como *buckyballs* en honor del arquitecto Buckminster Fuller, quien desarrolló el domo geodésico.

bastidores de los coches de carreras, hasta miembros artificiales o palos de golf. Los fullerenos son redes de átomos de carbono enlazados en forma de esfera, tubo o elipsoide. Por ejemplo, un fullereno consiste de 60 átomos de carbono enlazados en forma de pelota de fútbol. Los fullerenos se llaman así debido al arquitecto Buckminster Fuller y frecuentemente son llamados *buckyballs* o buckyesferas en tributo a su uso en domos geodésicos, como la gran nave espacial Earth en el corazón de Epcot Center en Walt Disney World. Los huecos de las *buckyballs* intrigan a los científicos, quienes prevén una variedad de usos en los compuestos. Los nanotubos de carbono son tubos sintéticos formados básicamente al doblar una placa de grafito sobre otra. Los nanotubos, con su única mezcla de propiedades, tienen gran potencial para las aplicaciones eléctricas.

Adicionalmente a las cuatro clases primarias, a veces es útil categorizar materiales basándose en propiedades específicas. Los materiales electrónicos, los materiales ópticos y los biomateriales incluyen subjuegos de metales, polímeros, cerámicas y compuestos, pero generalmente aparecen como categorías separadas debido a sus funcionalidades.

La revolución de las comunicaciones que ha conectado al mundo es el resultado directo de los desarrollos en los ***materiales electrónicos***. Estos materiales son primariamente clasificados debido a su capacidad para la conducción de electrones. Los ***semiconductores*** tienen conductividades entre el rango de aislantes y conductores. Los ***semiconductores intrínsecos*** son materiales puros, pero la mayoría de los semiconductores comerciales resultan de deliberadamente añadir una impureza llamada ***dopante***. Las tarjetas de silicio adulteradas proporcionan la base para la mayoría de los circuitos integrados que controlan todas las computadoras, teléfonos celulares y otras maravillas tecnológicas del mundo moderno.

Los ***biomateriales*** son materiales diseñados específicamente para su uso en aplicaciones biológicas. Los biomateriales están dentro de dos categorías primarias dependiendo de cómo se pretendan utilizar.

Los ***biomateriales estructurales*** se diseñan para aguantar cargas y proporcionar soporte a organismos vivientes. Los miembros artificiales y uniones de prótesis de caderas entran en esta categoría.

Los ***biomateriales funcionales*** tienen un propósito para un organismo. La sangre artificial, las membranas utilizadas para la diálisis y la piel sintética entran en esta categoría.

Con frecuencia la gente habla únicamente de los biomateriales sintéticos, pero los huesos, los músculos, la piel y una gran cantidad de otros elementos naturales también son biomateriales. Sólo al entender las propiedades específicas de los biomateriales naturales es que los científicos e ingenieros logren desarrollar sintéticos convenientes.

Algunas de las clases de materiales que se acaban de describir tienen subclases que contienen miles de elementos con algunas propiedades diferentes. Es irreal esperar aprenderse cada propiedad de cada material. Los dos capítulos siguientes se enfocan en las estructuras subyacentes comunes para muchas clases de materiales y las propiedades mecánicas y químicas que se pueden usar para comparar y contrastar los materiales. A partir del capítulo 4, cada clase de materiales es explorada a detalle para permitir al lector entender sus únicos beneficios y limitaciones y cómo estas propiedades se determinan.

| ***Materiales electrónicos*** |
Materiales que poseen la capacidad de conducir electrones como semiconductores.

| ***Semiconductores*** |
Materiales que tienen un rango de conductividad entre los conductores y los aislantes.

| ***Semiconductores intrínsecos*** |
Materiales puros que tienen una conductividad cuyo rango oscila entre los aislantes y los conductores.

| ***Dopante*** |
Impureza deliberadamente agregada a un material para mejorar la conductividad del material .

| ***Biomateriales*** |
Materiales diseñados específicamente para uso en las aplicaciones biológicas, como miembros artificiales y membranas para diálisis, así como un auxiliar en la reparación de huesos y músculos.

| ***Biomateriales estructurales*** |
Materiales diseñados para aguantar cargas y proporcionar soporte a un organismo viviente, como los huesos.

| ***Biomateriales funcionales*** |
Materiales que interactúan o reemplazan sistemas biológicos con una función primaria diferente a proporcionar soporte estructural.



Resumen del capítulo 1



En este capítulo se examinaron:

- La importancia de la ciencia de los materiales.
- Cómo las necesidades de la aplicación pretendida regulan la selección de los materiales.
- Por qué es necesario un alto entendimiento de la ciencia de los materiales para ir al día con los cambios y las demandas crecientes de propiedades mejoradas.
- El uso y la limitación de la heurística y los diagramas de Ashby en la selección de materiales.
- Los principios químicos fundamentales que destacan en la ciencia de los materiales.
- El reconocer que las propiedades cambian con el tiempo.
- La necesidad de evaluar el impacto económico de las decisiones sobre materiales a través del tiempo.
- La importancia de diseños sustentables y la selección de los materiales.
- Los principios de la ingeniería verde que deberían interferir en la selección y el diseño de los materiales.
- Las varias clases de materiales que se cubren a detalle en los capítulos subsecuentes.

Referencias

[1]G. Bruntland, ed., *Our Common Future: The World Commission on Environment and Development* (Oxford University Press, 1987).

[2]Envriromental Protection Agency de Estados Unidos, Proceedings of the Green Engineering Conference: Defining the Principles, Sandestin, Florida, mayo de 2003.

Términos clave

aleaciones *p. 23*
análisis del ciclo de vida (LCA) *p. 19*
biomateriales *p. 25*
biomateriales estructurales *p. 25*
biomateriales funcionales *p. 25*
cerámicas *p. 24*
ciclo de vida *p. 19*
compuestos *p. 24*
compuestos granulosos *p. 24*
compuestos laminares *p. 24*
compuestos reforzados con fibra *p. 24*
cuarto número cuántico *p. 11*
diagramas de Ashby *p. 9*
diamante *p. 24*
dopante *p. 25*
enlace de hidrógeno *p. 16*
enlace iónico *p. 13*
enlace metálico *p. 17*
electronegatividad *p. 14*
fibras de carbono *p. 24*
fuerza dipolar *p. 16*
fullerenos *p. 24*
grafito *p. 24*
ingeniería verde *p. 19*
interés *p. 18*
materiales electrónicos *p. 25*
mecánica cuántica *p. 10*
metales *p. 22*
modelo de Bohr *p. 10*
nanotubos de carbono *p. 24*
no polar *p. 14*
número cuántico principal *p. 10*
números cuánticos *p. 10*
orbitales *p. 10*
polar *p. 14*
polímeros *p. 22*
principio de exclusión de Pauli *p. 12*
proceso Pittsburgh *p. 5*

segundo número cuántico *p. 10*
semiconductores *p. 25*
semiconductores intrínsecos *p. 25*
spin *p. 11*
spines opuestos *p. 12*
spines paralelos *p. 12*
sustentabilidad *p. 19*
tercer número cuántico *p. 10*
termoestable *p. 22*
termoplástico *p. 22*
valor del dinero en el tiempo *p. 18*

Problemas de tarea

1. Para cada una de las siguientes aplicaciones, desarrollar una lista de propiedades necesarias y decidir qué tan significativo sería el rol económico en la selección final de materiales.

a) Asfalto para pavimentación de caminos.

b) Almohadillas de frenos para un auto.

c) Alas en aeronaves.

d) Tuberías en una casa.

2. Para cada una de las aplicaciones enlistadas, desarrollar una lista de propiedades necesarias y decidir qué tan significativo sería el rol económico en la selección final de materiales.

a) Estructuras de bicicleta.

b) Llantas para autos NASCAR.

c) Piel sintética para maletas.

d) Tijeras.

3. Considere la evolución de los medios de grabación desde los discos de vinilo hasta los CD. ¿Cómo cambiaron los retos de los materiales?

$ **4.** Un ingeniero debe decidir si usar válvulas planas de acero al carbono o una alternativa más cara de acero inoxidable. La planta utilizará 1 000 válvulas cada vez. Las válvulas de acero al carbono cuestan $400 cada una y durarán dos años antes de que sean reemplazadas. Las válvulas de acero inoxidable cuestan $1 000 cada una pero durarán seis años. Si se asume que cualquier reemplazo de válvulas ocurrirá durante el mantenimiento anual de rutina, ¿qué factores se deben considerar para lograr una decisión económica apropiada?

5. Clasifique los siguientes enlaces como primariamente iónicos, primariamente covalentes o metálicos:

a) Carbono-oxígeno

b) Sodio-potasio

c) Silicio-carbono

d) Potasio-cloro

6. ¿Por qué los electrones de valencia juegan un rol tan importante en el enlace entre los átomos?

7. Distinga entre enlaces primarios y secundarios, y describa tres ejemplos de enlaces secundarios.

8. Identifique dos productos comerciales fabricados con cerámicas. Describa el tipo de cerámica utilizada y porqué esa cerámica fue la mejor opción para el producto.

9. Identifique dos productos comerciales fabricados con polímeros. Describa el polímero específico utilizado y porqué ese polímero fue la mejor opción para el producto.

10. Identifique dos productos comerciales fabricados con metales. Describa el tipo de metal utilizado y porqué ese metal fue la mejor opción para el producto.

11. Dada la opción de usar un polímero termoplástico o termoestable con propiedades similares para una aplicación específica, ¿por qué el termoplástico sería una mejor opción?

12. Clasifique los siguientes materiales en polímero, metal, cerámica o compuesto:

a) Nitrato de boro

b) Ladrillos

c) Plexiglas

d) Concreto

e) Manganeso

13. Clasifique los siguientes materiales en polímero, metal, cerámica o compuesto:

a) Fibra de vidrio

b) Carburo de silicio

c) Papel aluminio

d) Teflón©

e) Seda

14. Durante la Segunda Guerra Mundial, el suministro de hule americano estuvo limitado. La Liga Profesional de Baseball respondió utilizando un material llamado balata en el centro de la pelota. El número de cuadrangulares declinó bruscamente. Averigüe cómo se hace una pelota de baseball y porqué la inclusión de un núcleo de balata impactaría tan mayormente el número de cuadrangulares.

15. Averigüe qué materiales se reúnen para su reciclaje en su colegio o universidad. ¿Qué sucede con estos materiales cuando salen del campus?

$ **16.** Describa los beneficios y las consecuencias negativas de enviar electrónicamente el periódico desde una empresa en vez de a través del Servicio Postal estadounidense.

17. Desarrolle una lista de entradas y salidas para bolsas de papel y plástico para abarrotes, empezando con los árboles que crecen en un bosque (papel) y el aceite en un campo de aceite (bolsas para abarrotes). ¿Existe una mejor alternativa que el papel o el plástico?

18. Considere los ciclos de vida para las bolsas de papel y plástico para abarrotes. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas ambientales y económicas de cada opción? $

19. Enliste los cuatro números cuánticos para todos los electrones en los siguientes átomos:

a) Litio

b) Helio

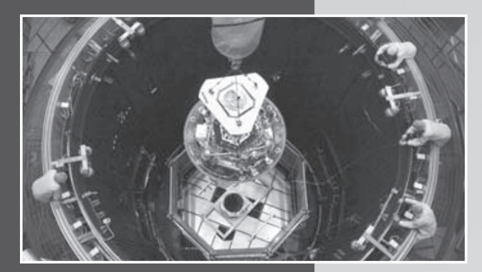
c) Carbono

20. ¿Cómo se relaciona el cuarto número cuántico al principio de exclusión de Pauli?



2 Estructura de los materiales

Photodisk/
SUPERSTOCK











Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el alumno debe ser capaz de:

- Explicar qué significa la cristalinidad y una celda unitaria.
- Identificar las 14 redes cristalinas de Bravais.
- Entender el significado de los términos básicos de la cristalografía incluyendo el parámetro de redes cristalinas y el espacio interplanar.
- Calcular la distancia entre los átomos en un cristal.
- Determinar los índices de una dirección cristalográfica, dado un vector representando esa dirección y determinar el vector que define una dirección cristalográfica dados los índices.



- Determinar los índices de Miller de un plano cristalino, si se muestra el plano, y dibujar el plano cristalino dado por los índices de Miller.
- Usar un diagrama de difracción de rayos X para identificar la estructura cristalina de un material y para calcular el espacio interplanar, los parámetros de redes cristalinas y el espesor cristalino.
- Entender los usos de la microscopía óptica y de electrones y las diferencias entre ellas.
- Explicar los dos procesos que se llevan a cabo en el crecimiento de los cristales.
- Identificar y explicar los defectos presentes en los materiales cristalinos.
- Explicar qué significa una frontera de grano y cómo impacta en las propiedades físicas.
- Entender cómo se mueven los defectos a través de un cristal.
- Determinar el esfuerzo cortante crítico resuelto para un sistema de deslizamiento dado bajo esfuerzo y explicar su impacto al deslizamiento.
- Distinguir entre la estructura de mosaico del cristal, cristales únicos y nanocristales.
- Calcular una densidad teorética para un material cristalino y explicar porqué este valor es probable que sea diferente a un valor experimentalmente medido.

¿Cómo están arreglados los átomos en los materiales?

2.1 INTRODUCCIÓN

En cristalografía, muchos alumnos se desconciertan inicialmente por el tópico de cómo los átomos están arreglados en los materiales. Algunos de los problemas se centran en la necesidad de usar la geometría para visualizar imágenes tridimensionales, pero con frecuencia el problema más grande es ver la relevancia del tópico. Los alumnos pueden aprender a calcular los índices de Miller y dibujar el plano adecuado, pero si sólo memorizaron un procedimiento sin obtener ninguna apreciación de cómo se vincula con los problemas más grandes en el curso, su aprendizaje tendrá muy poco de valor duradero. Los alumnos quieren saber exactamente cómo es que esta información

les ayudará a seleccionar el material correcto para una aplicación específica o para rediseñar un material existente para hacerlo más adecuado. La necesidad de entender la estructura del cristal (y toda la geometría y nomenclatura que le acompaña) se basa en el concepto de que la estructura de un material regula sus propiedades. Los materiales se eligen porque tienen propiedades adecuadas para una función determinada, y estas propiedades determinan si un material es adecuado o no. El comprender las estructuras de los materiales abre el portal al entendimiento de las propiedades del material que estas estructuras generan y los procedimientos de procesamiento que se pueden utilizar para alterar las estructuras y, como resultado, las propiedades del material. La figura 2-1 proporciona una representación gráfica de la inquebrantable interrelación entre la estructura, las propiedades y el procesamiento.

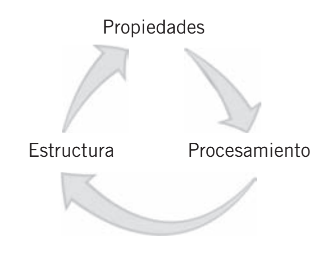


Figura 2-1 Relación entre estructura-propiedades-procesamiento

El desarrollo de la estructura de los materiales proporciona un punto perfecto de ingreso a un reino más amplio de la ciencia de materiales y de la ingeniería. Las propiedades de cualquier material se determinan por su estructura en cuatro niveles diferentes:

1. ***Estructura atómica.*** ¿Qué átomos están presentes y qué propiedades poseen?
2. ***Arreglo atómico.*** ¿Cómo están posicionados los átomos entre sí y qué tipo de enlace, si hubiera, existe entre ellos?
3. ***Microestructura.*** ¿Qué secuencia de cristales existe en un nivel tan pequeño que no es visible al ojo humano?
4. ***Macroestructura.*** ¿Cómo las microestructuras se ajustan para hacer un material más grande?

| ***Estructura atómica*** | El primer nivel de la estructura de los materiales que describe los átomos presentes.

| ***Arreglo atómico*** | El segundo nivel de la estructura de los materiales que describe cómo los átomos están posicionados entre sí y el tipo de enlace existente.

| ***Microestructura*** | El tercer nivel de estructura de los materiales que describe la secuencia de los cristales en un nivel invisible para el ojo humano.

| ***Macroestructura*** | El cuarto y último nivel de la estructura de los materiales que describe cómo las microestructuras se ajustan todas juntas para formar el material como un todo.

La tabla 2-1 muestra cómo estos niveles de orden aplican a los cristales de la sal. Las propiedades de un material están determinadas por los efectos combinados de los cuatro niveles completos y pueden ser alterados usando una variedad de técnicas de procesamiento. Este capítulo se enfoca en el desarrollo de la estructura en los materiales cristalinos e incluye una examinación relativamente detallada de difracción de rayos X. Esta examinación funge como una herramienta para aclarar el significado real y la relevancia de los términos cristalográficos en el capítulo.

2.2 NIVELES DE ORDEN

La mayoría de los materiales en este texto poseen un orden significativo, pero eso no es verdad para todos los materiales. El nivel más bajo del orden involucra moléculas de gas monoatómicas que llenan el espacio al azar, lo cual ha limitado la relevancia en el estudio de la ciencia de los materiales. En su lugar, la mayoría de los materiales tienen por lo menos algún orden de rango corto. Las moléculas de agua, que se muestran el la figura 2-2, proporcionan un ejemplo clásico de ese orden de rango corto. Los materiales con orden que se extienden sólo a los vecinos más cercanos son referidos como ***materiales amorfos*** (*a-* que significa sin, *morfo-* de forma). Algunos sólidos pueden ser amorfos también. Por ejemplo, los vidrios de sílice que se examinan en el capítulo 5 no tienen orden tridimensional.

| ***Materiales amorfos*** | Materiales cuyo orden se extiende sólo a los átomos vecinos más cercanos.

La mayoría de los sólidos tienen un orden tridimensional de rango largo significativo y forman una red cristalina regular. La ***estructura de cristal*** de un sólido es el tamaño, la forma y el arreglo de átomos dentro de esta red cristalina tridimensional. De hecho, las redes cristalinas se organizan por sí solas en uno de los 14 patrones llamados ***redes cristalinas de Bravais*** que se muestran en la figura 2-3.

| ***Estructura del cristal*** | El tamaño, la forma y el arreglo de los átomos en una red cristalina tridimensional.

| ***Redes cristalinas de Bravais*** | Las 14 estructuras distintas del cristal en las cuales los átomos se arreglan entre sí en los materiales.

| *Cúbica simple* |
Una red cristalina de Bravais que tiene un átomo en cada esquina de la celda unitaria.

Aunque todas las redes cristalinas de Bravais aparecen en la naturaleza, las tres redes cristalinas cúbicas son las más fáciles de visualizar y son usadas como la base para la mayoría de los comentarios en la siguiente sección. Las celdas unitarias ***cúbicas simples*** tienen un átomo en cada una de las ocho esquinas del cubo. Aunque es el más sencillo de visualizar, la estructura cúbica más simple es menos común que cualquiera de las otras dos formas cúbicas.

Tabla 2-1 Niveles de orden aplicados a los cristales de la sal

Estructura atómica	Átomos de sodio (Na) y cloro (Cl) enlazados iónicamente.	
Arreglo atómico	Múltiples moléculas de NaCl enlazadas para formar una red cristalina cúbica de cara centrada.	
Microestructura	A la orilla de una red cristalina se le llama borde grano. Estos bordes son visibles bajo un microscopio.	
Macroestructura	El ojo normal ve los cristales de NaCl como sólidos claros, aunque pueden estar coloreados con impurezas.	

| *Cúbica centrada en el cuerpo (BBC)* |
Una de las redes cristalinas de Bravais que contiene un átomo en cada una de las esquinas de la celda unitaria así como un átomo en el centro de la celda unitaria.

| *Cúbica de caras centradas (FCC)* |
Una de las redes cristalinas de Bravais que tiene un átomo en cada una de las esquinas de la celda unitaria y un átomo en cada una de las caras de la celda unitaria..

| *Paquete cerrado hexagonal (HCP)* |
La más común de las redes cristalinas de Bravais no cúbicas que tiene seis átomos que forman un hexágono en las partes superior e inferior y un átomo sencillo posicionado en el centro entre dos anillos hexagonales.

Las celdas unitarias ***cúbicas centradas en el cuerpo* (BBC** por sus siglas en inglés) también tienen un átomo en cada una de las ocho esquinas, pero un átomo adicional está presente en el centro del cubo. Las celdas unitarias ***cúbicas de caras centradas* (FCC** por sus siglas en inglés) tienen un átomo en cada una de las ocho esquinas, más un átomo en cada una de las seis caras del cubo. De las redes cristalinas no cúbicas, el ***paquete cerrado hexagonal* (HCP** por sus siglas en inglés) es el más común. La parte superior e inferior de la red cristalina consiste de seis átomos que forman un hexágono que rodea a un solo

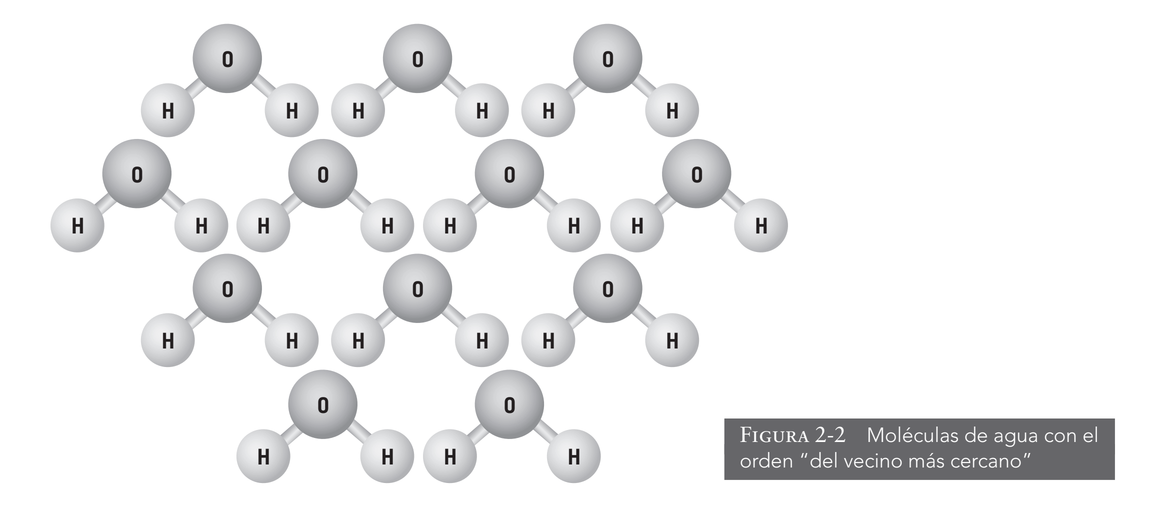


Figura 2-2 Moléculas de agua con el orden "del vecino más cercano"

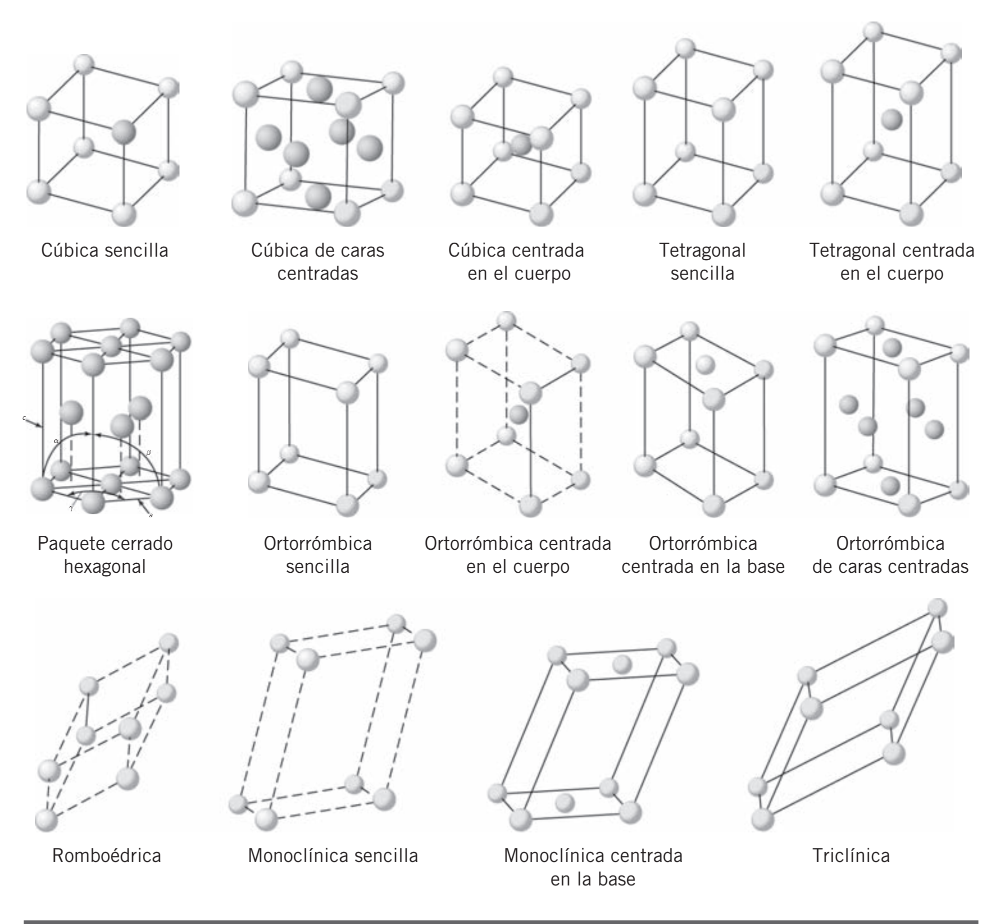


Figura 2-3 Catorce redes cristalinas de Bravais

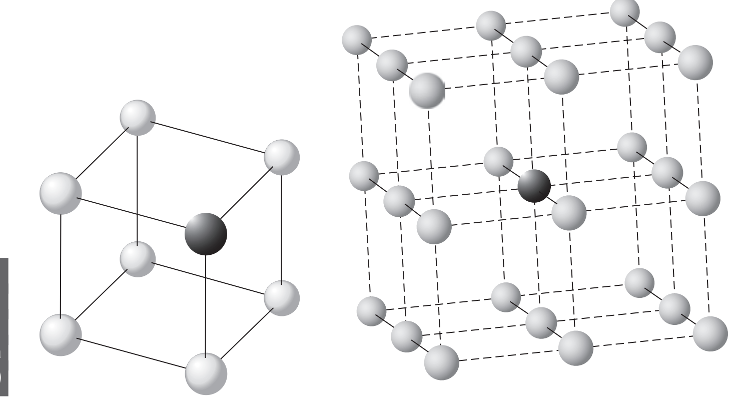


Figura 2-4 Representación esquemática de redes cristalinas múltiples que comparten átomos (El átomo de color muestra su posición en una celda unitaria y en la red cristalina completa.)

átomo en el centro. Un racimo triangular de tres átomos reside entre los planos superior e inferior como se muestra en la figura 2-3.

Obviamente, otras redes cristalinas comparten la mayoría de los átomos presentes en una celda unitaria. Ocho diferentes celdas unitarias comparten un átomo en la esquina de una red cristalina cúbica, como se muestra en la figura 2-4. Dos celdas unitarias comparten el átomo en una cara de una celda unitaria FCC, mientras que sólo una celda unitaria reclama el átomo central en una celda unitaria BCC.

2.3 PARÁMETROS DE REDES CRISTALINAS Y FACTORES DE PAQUETE ATÓMICO

| ***Celda unitaria*** | La subdivisión más pequeña de una red cristalina que todavía contiene las características de la red cristalina.

| ***Parámetros de redes cristalinas*** | Las longitudes de la orilla y los ángulos de una celda unitaria.

Una ***celda unitaria*** es la subdivisión más pequeña de una red cristalina que conserva las características de la red cristalina. En el caso de la red cristalina más básica, la cúbica sencilla, la celda unitaria es solo un cubo con un átomo que ocupa cada uno de los ocho puntos de las esquinas. Los tamaños y formas de las redes cristalinas son descritas por un conjunto de longitudes de la arista y ángulos llamados *parámetros de redes cristalinas*. Para cualquier sistema, una mezcla de longitudes (a, b y c) junto con los ángulos (α, β y γ) definen la forma de la red cristalina, como se muestra en la figura 2-5. Para cualquiera de los sistemas cúbicos, las tres longitudes (a, b y c) son equivalentes, así que un sencillo parámetro de red cristalina (a) se puede utilizar para definir la red cristalina cúbica completa. Adicionalmente, todos los ángulos son de 90 grados para una red cristalina cúbica. La estructura HCP más compleja requiere de dos parámetros de redes cristalinas. La distancia más corta entre los átomos en el hexágono está representada por ***a***, mientras que la dirección más larga entre los hexágonos está representada por ***c***, como se muestra en la figura 2-5. Muchos metales, incluyendo el berilio y el magnesio, tienen redes cristalinas HCP.

Aunque se suelen dibujar redes cristalinas como si fueran del tipo de forma abierta grande, como se muestra en las figuras 2-3 y 2-4, los átomos en realidad están más cercanamente empacados como se muestra en la figura 2-6. Este empaque cerrado permite el cálculo del parámetro de la red cristalina. Para el sistema cúbico sencillo, la distancia entre los centros de los dos átomos es simplemente la suma del radio atómico de los átomos:

$$a = r_1 + r_2. \tag{2.1}$$

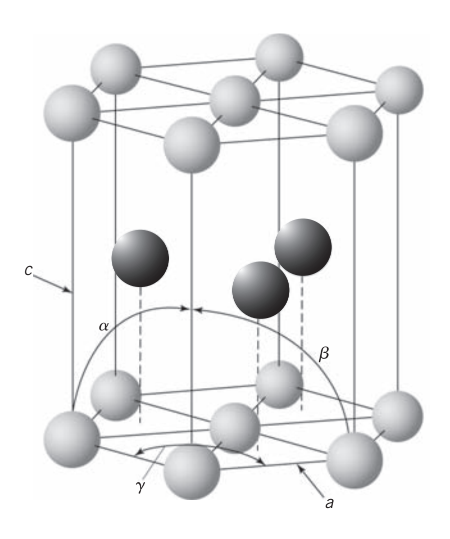


Figura 2-5 Estructura HCP con parámetros de redes cristalinas etiquetadas

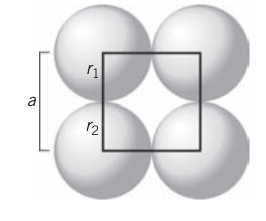


Figura 2-6 Paquete real de moléculas

Si un solo tipo de átomo está presente en la red cristalina, los radios atómicos son los mismos. El parámetro de red cristalina de un material puro (a_0) está designado con un subíndice. La geometría básica se puede utilizar para calcular los parámetros de la red cristalina para configuraciones de redes cristalinas diferentes, como se muestra en la tabla 2-2.

Estas fórmulas permiten el cálculo del parámetro de red cristalina para cualquier material que tenga una estructura cristalina conocida, siempre que el radio atómico también sea conocido. La tabla 2-3 resume los radios atómicos para varios metales comunes.

El otro parámetro relevante determinado por la estructura del cristal es el *factor de paquete atómico* (*APF* por sus siglas en inglés), la cantidad de la celda unitaria ocupada por los átomos en oposición al espacio vacío. La tabla 2-4 resume los APF para las redes cristalinas comunes.

| ***Factor de paquete atómico (APF)*** |
Cantidad de celdas unitarias ocupadas por átomos en oposición al espacio vacío.

Tabla 2-2 Parámetros de redes cristalinas con base en los radios atómicos para los sistemas de redes cristalinas comunes

Tipo de red cristalina	*Parámetro de red cristalina (a_0)*	*Representación gráfica*
Cúbica sencilla	$a_0 = 2r$	2r

(*continúa*)

Tabla 2-2 Parámetros de redes cristalinas con base en los radios atómicos para los sistemas de redes cristalinas comunes *(continuación)*

Tipo de red cristalina	*Parámetro de red cristalina (a_0)*	*Representación gráfica*
Cúbica centrada en el cuerpo (BCC)	$a_0 = \frac{4r}{\sqrt{3}}$	
Cúbica de caras centradas (FCC)	$a_0 = \frac{4r}{\sqrt{2}}$	
Paquete cerrado hexagonal (HCP)	$a_0 = 2rc_0$ $= 3.266r$	

Tabla 2-3 Radios atómicos para metales comunes

Material	*Tipo de red cristalina*	*Radio atómico (nm)*
Aluminio	FCC	0.143
Cromo	BCC	0.125
Cobalto	HCP	0.125
Cobre	FCC	0.128
Oro	FCC	0.144
α-Fierro	BCC	0.124
γ-Fierro	FCC	0.124
Plomo	FCC	0.175
Magnesio	HCP	0.160
Níquel	FCC	0.125
Platino	FCC	0.139
Plata	FCC	0.144
Titanio	HCP	0.144
Tungsteno	BCC	0.137
Zinc	HCP	0.133

Tabla 2-4 Factores de paquete atómico para diferentes tipos de redes cristalinas

Tipo de redes cristalinas	*APF*
BCC	0.68
FCC	0.74
HCP	0.74

Ejemplo 2-1

Calcular el parámetro de redes cristalinas para una red cristalina de átomos de plomo.

SOLUCIÓN

Los átomos de plomo forman una red cristalina cúbica de cara centrada (FCC) y tienen un radio atómico de 0.175 nm (nanómetros). El parámetro de red cristalina para un sistema FCC está dado en la tabla 2-2 como $a_0 = \frac{4r}{\sqrt{2}}$. Por lo tanto, $a_0 = \frac{4*(0.175 \text{ mm})}{\sqrt{2}}$. $a_0 = 0.495$ nm.

2.4 ESTIMACIONES DE DENSIDAD

| *Densidad teorética* |
La densidad que un material tendrá si éste consiste de una sola red cristalina perfecta.

Con un conocimiento completo de la estructura de redes cristalinas, la ***densidad teorética*** de un material puede ser calculada a partir de la ecuación

$$\rho = \frac{nA}{N_A V_C}, \tag{2.2}$$

donde ρ es la densidad teorética del material, n es el número de átomos por celda unitaria, A es el peso atómico del material, N_A es el número de Avogadro (6.022×10^{23} átomos/mol) y V_c es el volumen de una celda unitaria. Para un sistema cúbico, el volumen de la celda unitaria es el cubo del parámetro de la red de cristales (a_0^3). Esta fórmula proviene de la definición básica de densidad como masa sobre volumen.

Para determinar el número de átomos por celda unitaria, primero se debe determinar cuántas celdas unitarias comparten cada átomo. Una celda en ángulo en una red cristalina cúbica está compartida por ocho diferentes celdas unitarias, como se muestra en la figura 2-4, mientras que una celda en una cara es compartida por solo dos. La celda del cuerpo en una estructura BCC pertenece por completo a una celda. Como resultado, los puntos son asignados con base en la ubicación. Los átomos angulares obtienen $\frac{1}{8}$ de un punto, los átomos en las caras reciben 1/2 de un punto, mientras que los átomos del cuerpo reciben 1 punto. El número de átomos por celda es la suma de los puntos asignados a la celda. Una sola celda unitaria cúbica tiene solo ocho átomos angulares, cada uno vale 1/8 de punto para un total de un átomo por celda. Una celda unitaria FCC tiene ocho átomos angulares que valen $\frac{1}{8}$ de punto cada uno, más seis átomos en las caras, cada uno vale $\frac{1}{8}$ punto. Una celda unitaria

Ejemplo 2-2

Determinar la densidad teorética del cromo a 20° C.

SOLUCIÓN

De la tabla 2-3 se sabe que el cromo tiene una estructura BCC con un radio atómico de 0.125 nm. También se sabe que la densidad teorética de un material está dado por la ecuación 2.2:

$$\rho = \frac{nA}{N_A V_C}.$$

Para un sistema BCC, $n = 2$ átomos (uno para un átomo del cuerpo, uno de los átomos angulares), $A = 52$ g/mol (de la tabla periódica de elementos) y $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ átomos/mol.

Para calcular I se necesita saber el parámetro (I_0) de la red cristalina. La tabla 2-2 indica que el parámetro de red cristalina para un sistema BCC está dado por

$$a_0 = \frac{4r}{\sqrt{3}}, \text{ así, } = \frac{4(0.125 \text{ nm})}{\sqrt{3}} \rightarrow a_0 = \frac{4(0.125 \text{ nm})}{\sqrt{3}} = 0.289 \text{ nm}$$

$$V_C = a_0^3 = (0.289 \text{ nm})^3 = 0.0241 \text{ nm}^3$$

$$\rho = \frac{nA}{N_A V_C} = 7.17 \times 10^{-21} \text{ g/nm}^3 \text{ o } 7.17 \text{ g/cm}^3.$$

FCC tiene cuatro átomos por celda. Similarmente, las celdas BCC tienen ocho átomos angulares (cada uno vale $\frac{1}{8}$ de punto) más un átomo del cuerpo que vale 1 punto, para un total de dos átomos por celda unitaria.

Los cálculos de la densidad teorética asumen una red cristalina perfecta, pero como se verá más adelante en este capítulo, las redes cristalinas contienen muchos tipos diferentes de imperfecciones. Como resultado, los materiales reales son ligeramente menos densos que los cálculos teóricos predecidos.

2.5 DIRECCIONES Y PLANOS CRISTALOGRÁFICOS

Cuando es necesario determinar una dirección en un cristal, un sistema simplificado de índices se usa para representar el vector que define la dirección. Un punto en la red cristalina se elige arbitrariamente como el origen, y todos los demás puntos están etiquetados relativos a ese punto. La figura 2-7 muestra una red cristalina cúbica sencilla con puntos etiquetados. En cada caso, el número de los puntos representa el número de parámetros de redes cristalinas movidas en las direcciones x, y y z. Si el punto es menor a un parámetro de red cristalina a partir del origen en una dirección determinada, un valor fraccional se usa. Identificar los puntos es un paso esencial en la determinación de las dimensiones y planos cristalográficos.

El determinar los índices para una dirección es un procedimiento directo de cuatro pasos:

1. Usar un sistema de coordenadas dextrógiro, para determinar las coordenadas de dos puntos que caen en una línea en la dirección de interés.

2. Sustraer las coordenadas del punto final desde las coordenadas del punto principal para determinar el número de parámetros de redes cristalinas que viajaron en la dirección de cada eje.

3. Simplificar fracciones y reducir el resultado al entero más cercano (para que 1.25 se convierta en 1).

4. Escribir los números entre corchetes con una línea arriba de los números negativos (por ejemplo: $[1\ \overline{2}\ 0]$ que corresponderá a 1 en la dirección x, -2 en la dirección y y 0 en la dirección z).

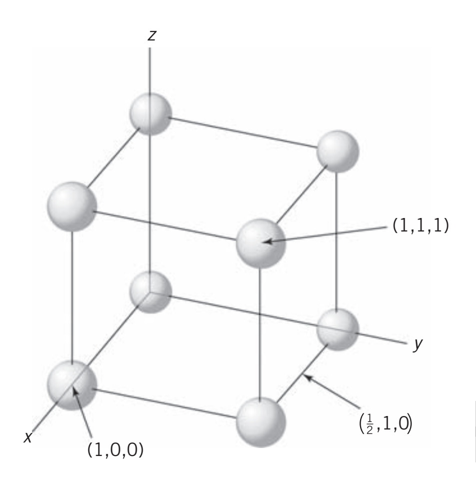
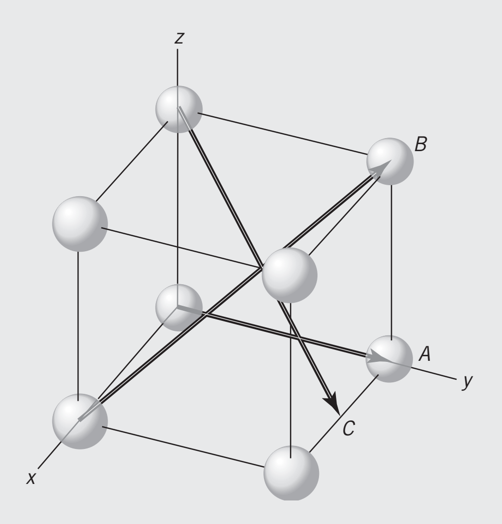


Figura 2-7 Etiquetado cristalográfico de átomos

Ejemplo 2-3

Determinar los índices para las direcciones *A*, *B* y *C* que se muestran en la figura.



SOLUCIÓN

A: Punto final (0, 0, 0); punto principal (0, 1, 0)
0, 1, 0 − 0, 0, 0, = 0, 1, 0
Ninguna fracción para simplificar
[0 1 0] son los índices para la dirección *A*

B: Punto final (1, 0, 0); punto principal (0, 1, 1)
0, 1, 1 − 1, 0, 0 = −1, 1, 1
Ninguna fracción para simplificar
[$\bar{1}$ 1 1] son los índices para la dirección *B*

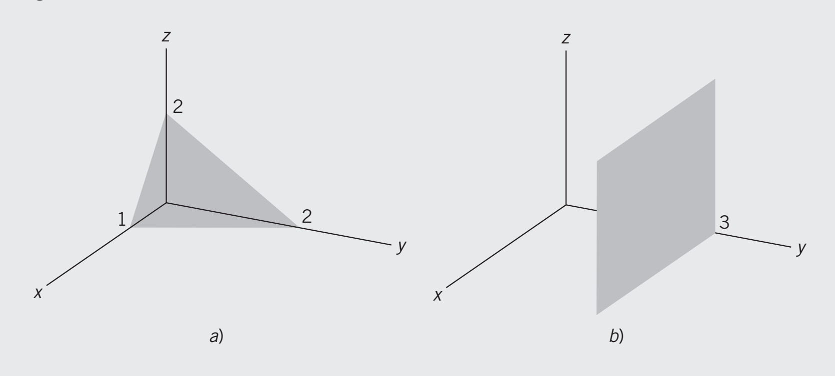
C: Punto final (0, 0, 1); punto principal ($\frac{1}{2}$, 1, 0)
$\frac{1}{2}$, 1, 0 − 0, 0, 1 = $\frac{1}{2}$, 1, −1
Multiplicar por 2 para simplificar la fracción
[1 2 $\bar{2}$] son los índices para la dirección *C*

Algunos puntos de potencial confusión valen la pena aclararse respecto a los índices para las direcciones. Específicamente,

- Las direcciones son vectores unitarios, así que los signos opuestos son desiguales. Existen direcciones opuestas a lo largo de la misma línea (llamados antiparalelos); por ejemplo, [0 0 1] ≠ [0 0 $\bar{1}$].
- Las direcciones no tienen magnitud, de igual forma, una dirección y su múltiplo son iguales siempre que los signos no cambien; por ejemplo, [1 2 3] = [2 4 6] = [3 6 9].

Ejemplo 2-4

Determinar los índices de Miller para los planos que se muestran en la figura.



SOLUCIÓN

A: El plano intercepta los ejes de coordenadas en (1, 2, 2).

Las recíprocas son $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$.

Multiplicar por 2 para simplificar las fracciones 2, 1, 1.

(2 1 1) son los índices de Miller del plano.

B: El plano intercepta los ejes en $(\infty, 3, \infty)$.

Las recíprocas son $0, \frac{1}{3}, 0$.

Multiplicar por 3 para simplificar las fracciones: $3 * 0, \frac{1}{3}, 0, \rightarrow 0, 1, 0$

(0 1 0) son los índices de Miller del plano.

2.6 ÍNDICES DE MILLER

En los cristales, en tanto que las direcciones son importantes, frecuentemente se está más preocupado por sus planos. Cualquiera de los tres sitios de redes cristalinas en un cristal se pueden utilizar para definir un plano, así que se desarrolló otro sistema de índices para aclarar qué plano está a discusión. Los ***índices de Miller*** para un plano que atraviesa cualquiera de los tres puntos en una red cristalina se determinan usando un procedimiento de cuatro pasos que es similar al que se usa para encontrar índices de una dirección. El procedimiento para determinar los índices de Miller de un plano es:

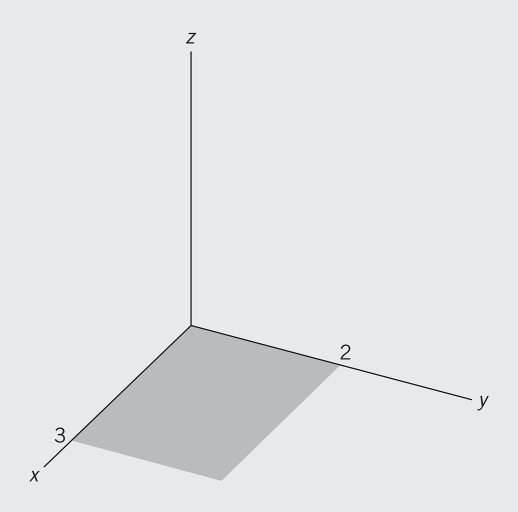
| ***Índices de Miller*** | Un sistema numérico usado para representar planos específicos en una red cristalina.

1. Identificar dónde intercepta el plano las líneas de coordenadas x, y y z en los términos de número de parámetros de redes cristalinas.
2. Tomar la recíproca de estos tres puntos.
3. Simplificar las fracciones pero no reducir los resultados.
4. Anexar los resultados en paréntesis.

Nota: Si el plano nunca cruza un eje, se toma para interceptar en el infinito.

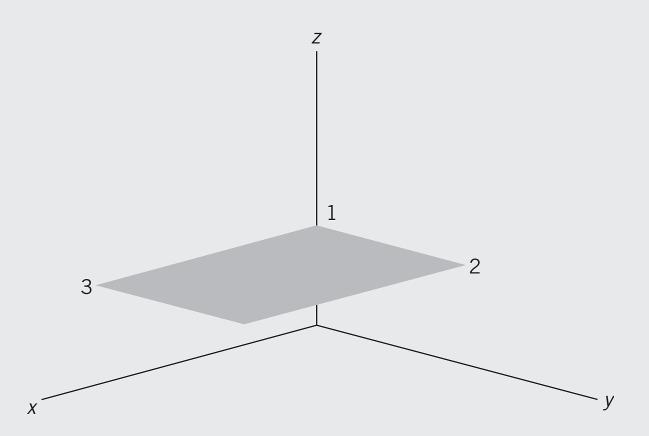
Ejemplo 2-5

Determinar los índices de Miller del siguiente plano:



SOLUCIÓN

El plano pasa atravesando el origen, así que intercepta los ejes *x* y *y* en cualquier lugar y el eje *z* en cero, pero una intercepción cero resultaría en un índice *z* infinito. Así que se mueve el origen hacia abajo con un parámetro de red cristalina en la dirección *z*:



Ahora la intercepción en *z* está en uno, mientras que las intercepciones *x* y *y* se vuelven infinitas.
Intercepciones en (∞, ∞, 1).
Las recíprocas son 0, 0, 1.
No se simplifican fracciones.
(0 0 1) son los índices de Miller del plano.

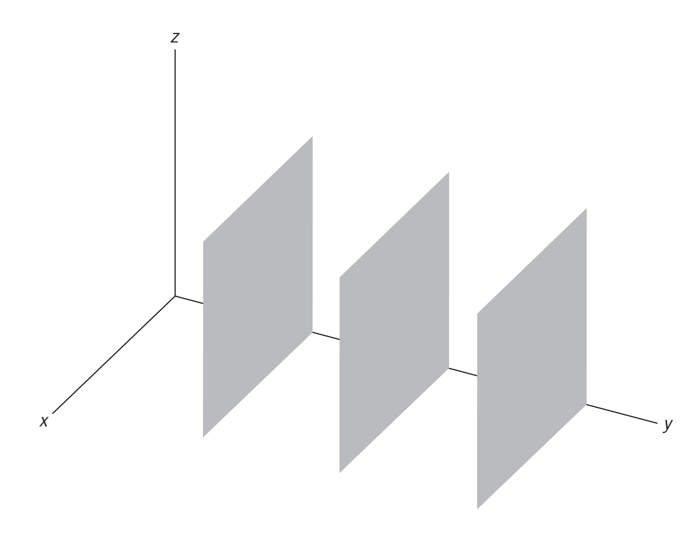


Figura 2-8 Planos repetidos en un cristal

Los índices de Miller de los planos tienen propiedades especiales algo diferentes a las direcciones. Cuando se trata de planos:

- Los índices de Miller y sus negativos son idénticos; por ejemplo, (0 1 2) = $(0\ \bar{1}\ \bar{2})$.
- Los índices de Miller y sus múltiplos son diferentes; por ejemplo, (1 2 3) ≠ (2 4 6).

Existe otra complicación potencial en el cálculo de los índices de Miller para un plano. Si el plano atraviesa un eje de coordenadas, la intercepción para esa dimensión será cero. Esto resultará en un índice de Miller indefinido, en esencia infinito, que no puede existir. Afortunadamente, la selección de un punto como el origen fue arbitrario. Cualquier átomo en la red cristalina puede ser establecido como el origen, así que se puede mover el origen para que la intercepción no siga atravesando el eje de coordenadas. El ejemplo 2-5 muestra esto con más claridad.

Dentro de un cristal determinado, los mismos planos están repetidos muchas veces. La figura 2-8 muestra una serie de planos, todos con los mismos índices de Miller. Aunque estos planos son réplicas perfectas, la distancia entre éstos es significativa. La distancia entre los planos repetidos en una red cristalina se llama ***espacio interplanar*** (d).

| ***Espacio interplanar*** |
La distancia entre planos repetidos en una red cristalina.

¿Cómo se miden los cristales?

2.7 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La difracción de rayos X es una poderosa herramienta usada para medir la cristalinidad y otras variables dependientes de la red cristalina. La difracción de rayos X también ayuda para aclarar el significado físico de los planos y los índices de Miller. El principio de difracción de rayos X se ha desarrollado del estudio de la óptica. La radiación electromagnética (incluyendo los rayos X y la luz visible) viaja en ondas. Cada tipo de onda electro-

| *Difracción* |
La interacción de ondas.

| *Interferencia constructiva* |
El incremento en amplitud resultante de dos o más ondas interactuando en fase.

| *Interferencia destructiva* |
Nulificación causada por dos ondas interactuando fuera de fase.

| *Ecuación de Bragg* |
La fórmula que relaciona el espacio interplanar en una red cristalina a una interfase constructiva de rayos X difractados. Nombrada en honor de padre e hijo (W.H. y W.L. Bragg) quienes probaron la relación.

magnética tiene una longitud de onda característica (λ). Las longitudes de onda en el rango de rayos X son difícilmente del mismo tamaño que la mayoría de las distancias interatómicas. Cuando una onda golpea un objeto sólido (por ejemplo: un núcleo atómico), ésta rebota desde el objeto con un ángulo de reflexión igual al ángulo de incidencia. La figura 2-9 muestra un haz de rayos X que golpea los átomos en una red cristalina.

La *difracción* describe la interacción de ondas. La figura 2-10 muestra dos ondas en fase agregadas a través de la ***interferencia constructiva*** y dos ondas fuera de la fase canceladas a través de la ***interferencia destructiva.***

En una máquina de difracción de rayos X como la que se muestra esquemáticamente en la figura 2-11, una fuente dispara rayos X a una muestra y un detector compila los rayos difractados. La fuente y el detector se mueven juntos a través de diferentes ángulos pero siempre mantienen la misma relación "ángulo de incidencia igual al ángulo de reflexión" entre sí. Debido a que muchos átomos diferentes están presentes en la red cristalina, la mayoría de las ondas se cancelan. La interferencia constructiva neta resulta sólo cuando la ***ecuación de Bragg*** se satisface.

$$N\lambda = 2d \text{ sen } \theta, \tag{2.3}$$

donde N es el orden de las reflexiones (tomadas para ser 1), λ es la longitud de onda del haz de rayos X, d es el espacio interplanar y θ es el ángulo de incidencia. Los órdenes de reflexión más grandes que 1 son contabilizados por los índices de Miller.

Los datos generados por un experimento de difracción de rayos X consisten en una medición de las lecturas de intensidad en el detector como una función del ángulo de incidencia. El ángulo es generalmente reportado como 2 θ, debido a que la fuente y el detector están en un ángulo θ. Cuando no hay interferencia constructiva, no se detecta más que dispersión de fondo. En los valores 2 θ en los cuales ocurre la interferencia constructiva, se detecta un

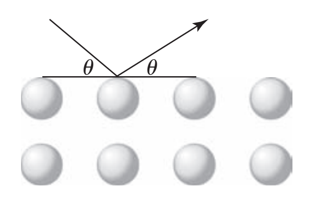


Figura 2-9 Rayos X golpeando a una red cristalina de un cristal.

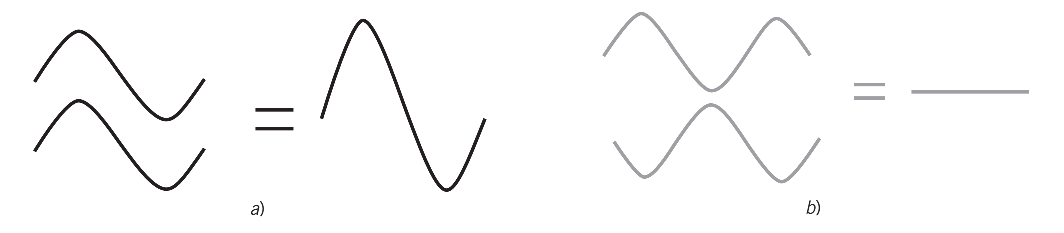


Figura 2-10 Patrones de interferencia para rayos X: *a*) interferencia constructiva, *b*) interferencia destructiva.

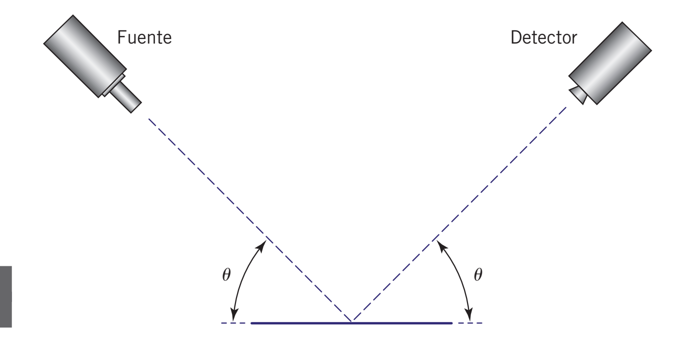


Figura 2-11 Operación de equipo de difracción de rayos X

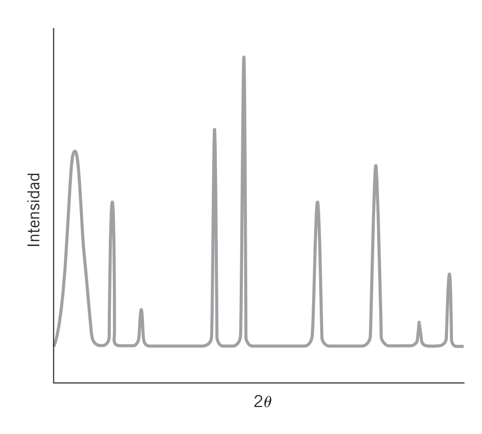


Figura 2-12 Muestra del difractograma de rayos X.

nivel de radiación incrementado. Una típica lectura de difracción de rayos X se muestra en la figura 2-12.

Cada pico en el difractograma corresponde a un plano diferente en el cristal. Muchos cálculos se pueden hacer usando difractogramas de rayos X y la ecuación de Bragg. Si la longitud de onda de la fuente de los rayos X se conoce, entonces la ecuación de Bragg se puede reordenar para determinar el espacio interplanar del plano correspondiente a cada pico,

$$d = \frac{n\lambda}{2 \operatorname{sen} \theta}. \tag{2.4}$$

Debido a que muchos planos están presentes en un cristal determinado, se identifican por sus correspondientes índices de Miller ($h\ k\ l$). De tal manera que la ecuación 2.3 se puede escribir más adecuadamente como

$$d_{hkl} = \frac{n\lambda}{2 \operatorname{sen} \theta}. \tag{2.5}$$

El espacio interplanar (d_{hkl}) de cualquier plano dado en un sistema cúbico puro puede estar relacionado con el parámetro de la red cristalina por la siguiente ecuación:

$$d_{hkl} = \frac{a_0}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}. \tag{2.6}$$

Sin importar los átomos específicos, la existencia de cualquier plano específico es una función de los tipos de redes cristalinas. Existe un conjunto específico de combinaciones $h^2 + k^2 + l^2$ (llamadas ***condiciones de extinción***) que es el mismo para cualquier red cristalina cúbica sencilla; un conjunto diferente está presente para todas las redes cristalinas cúbicas de caras centradas, y un tercer conjunto existe para toda red cristalina cúbica de cuerpo centrado. La tabla 2-5 resume las reflexiones presentes para cada tipo de red cristalina cúbica.

| ***Condiciones de extinción*** |
La reducción sistemática en la intensidad de los picos de difracción de los planos de redes cristalinas específicas.

La tabla 2-5 muestra que la suma de los índices de Miller ($h^2 + k^2 + l^2$) para el plano que produce el primer pico de difracción en un sistema BCC debe ser igual a 2. Por lo tanto, la ecuación 2.6 se puede utilizar para calcular el parámetro de la red cristalina para cada plano, si se conoce el tipo de red cristalina. Para cualquier red cristalina cúbica, el parámetro de red cristalina debe ser el mismo en cada dirección, que proporcione una marca de los otros cálculos.

El difractograma también se puede usar para determinar el tipo de red cristalina presente en el material. Si las ecuaciones 2.5 y 2.6 se combinan, resulta:

$$\operatorname{sen}^2\theta = \frac{\lambda^2}{4a_0^2}(h^2 + k^2 + l^2). \tag{2.7}$$

Tabla 2-5 Reflexiones presentes para cada clase de red cristalina cúbica

Clase de red cristalina	$h^2 + k^2 + l^2$
BCC	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16
FCC	3, 4, 8, 11, 12, 16
Simple	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8

Ejemplo 2-6

Una fuente de difracción de rayos X con una longitud de onda de 0.7107 angstroms es radiado mediante una muestra para generar los siguientes picos. Si el material tiene una estructura de red cristalina BCC, determine el espacio interplanar, el parámetro de red cristalina y la suma de los cuadrados de los índices de Miller para cada plano.

Pico	2θ
1	20.20
2	28.72
3	35.36

SOLUCIÓN

Para cualquier pico dado, el espacio interplanar está dado por la ecuación 2.5, $d_{hkl} = n\lambda/2$ sen θ, de modo que d_{hkl} = (1)(0.7107 angstroms)/2 sen (10.10°) = 2.026 angstroms.

Para un sistema BCC, la tabla 2.5 muestra que la suma de los cuadrados de los índices de Miller para el primer plano debería ser 2. Por lo tanto, la ecuación 2.6 se puede utilizar para calcular el parámetro de la red cristalina (a_0):

$$d_{hkl} = \frac{a_0}{\sqrt{(h^2 + k^2 + l^2)}}$$

$$(2.026 \text{ angstroms}) = \frac{a_0}{\sqrt{2}}$$

$$a_0 = 2.868 \text{ angstroms}$$

para dar los resultados que a continuación se resumen:

Pico	2θ(°)	d_{hkl} (angstroms)	$h^2 + k^2 + l^2$	a_0 (angstroms)
1	20.20	2.026	2	2.867
2	28.72	1.432	4	2.865
3	35.36	1.170	6	2.867

La ecuación 2.7 se puede utilizar para analizar la relación entre los picos. Debido a que la longitud de onda de los rayos X no cambia y el parámetro de red cristalina es el mismo para todos los planos en una red cristalina cúbica, la ecuación 2.7 se puede aplicar a dos picos para proporcionar

$$\frac{\text{sen}^2\theta_2}{\text{sen}^2\theta_1} = \frac{(h^2 + k^2 + l^2)_2}{(h^2 + k^2 + l^2)_1} \tag{2.8}$$

La proporción de los términos $\text{sen}^2\theta$ en el miembro izquierdo de la ecuación 2.8 da la proporción relativa de las sumas de los cuadrados de los índices de Miller de los dos picos. Junto con la información de la tabla 2-5 se puede identificar el pico. El ejemplo 2-7 ilustra más claramente esto.

Ejemplo 2-7

Determinar la clase de red cristalina en el material responsable de la siguiente información de difractograma:

Pico	2θ
1	20.20
2	28.72
3	35.36
4	41.07
5	46.19
6	50.90
7	55.28
8	59.42

SOLUCIÓN

Se comienza por aplicar la ecuación 2.8 a los dos primeros picos. Observe que el valor enlistado en la tabla es 2θ, mientras que θ es necesaria para la ecuación.

$$\frac{\text{sen}^2(14.36)}{\text{sen}^2(10.10)} = \frac{(h^2 + k^2 + l^2)_2}{(h^2 + k^2 + l^2)_1}$$

lo que da

$$\frac{0.0615}{0.0308} = \frac{(h^2 + k^2 + l^2)_2}{(h^2 + k^2 + l^2)_1} = 2$$

Esto dice que la proporción de la suma de los cuadrados de los índices de Miller de los primeros dos picos es 2. No hay manera alguna de saber la suma de las reflexiones para el primer pico, pero se acaba de determinar que $(h^2 + k^2 + l^2)$ para el segundo pico es el doble del primero. De acuerdo con la tabla 2-5, los valores $(h^2 + k^2 + l^2)$ para los dos primeros picos de un sistema BCC son 2 y 4. La proporción de $\frac{4}{2}$ es 2, así que podría

ser un sistema BCC. Similarmente, el sistema cúbico simple tiene valores ($h^2 + k^2 + l^2$) de 1 y 2 para sus dos primeros picos, así es que este sistema permanece como una posibilidad. Sin embargo, los primeros dos picos de FCC tienen valores 3 y 4. Esto da una proporción de 1.33 en vez de 2, indicando que el difractograma podría no haberse generado por una red cristalina FCC.

Ahora compare cada pico en el difractograma con el primer pico.

Pico	2θ	$Sen^2\theta$	$Sen^2\theta / Sen^2\theta_4$
1	20.20	0.0308	1
2	28.72	0.0615	2
3	35.36	0.0922	3
4	41.07	0.1230	4
5	46.19	0.1539	5
6	50.90	0.1847	6
7	55.28	0.2152	7
8	59.42	0.2456	8

De acuerdo con la tabla 2-5, si la red cristalina fuera cúbica simple, el pico 7 tendría un valor ($h^2 + k^2 + l^2$) que sería ocho veces el del pico 1. En vez de esto, el pico 7 tiene un valor ($h^2 + k^2 + l^2$) que es siete veces el del pico 1. El único patrón que obtendría esta proporción exacta sería el cúbico centrado en el cuerpo, para el cual ($h^2 + k^2 + l^2$) es 2 para el pico 1 y 14 para el pico 7.

| *Cristalitas* | Regiones de un material en la que los átomos están acomodados con un patrón regular.

| *Fronteras de grano* | Las áreas de un material que separan las distintas regiones cristalitas.

| *Mosaico de cristal* | Estructura hipotética para irregularidades en las fronteras entre cristalitas.

| *Ecuación de Scherrer* | Medio para relacionar la cantidad de esparcimiento en un difractograma de rayos X con el espesor de las cristalitas en la muestra.

Hasta ahora, gran parte del análisis ha tratado a los materiales como si estuvieran compuestos de una sola red cristalina perfectamente alineada. Por el contrario, los materiales reales consisten de regiones cristalinas, o ***cristalitas***, separadas entre sí mediante ***fronteras de grano***. Por lo tanto, un material real expone una estructura mucho más parecida al ***mosaico de cristal*** que se muestra en la figura 2-13.

El mismo difractograma de rayos X proporciona información sobre el tamaño promedio de la cristalita. Si el material fuera un cristal puro, cada pico sería extremadamente delgado y virtualmente no tendría esparcimiento. En la realidad, cada pico se esparce a través de un rango de 2θ valores. Para los granos relativamente pequeños, la cantidad de esparcimiento está relacionada con el espesor de las cristalitas en un plano mediante la ***ecuación de Scherrer***:

$$t = \frac{0.9\lambda}{B \cos \theta_B}, \qquad (2.9)$$

en donde t representa el espesor de la cristalita, λ es la longitud de onda de la fuente de rayos X, B es el esparcimiento en el pico y θ_B es el valor θ en la cima del pico. Debido a que un pico de difracción se reduce conforme se acerca a la cima, el esparcimiento en el pico depende de en dónde es medido.

Como un estándar se utiliza la ***anchura a media altura (FWHM por sus siglas en inglés),*** queriendo decir que el esparcimiento en el pico se mide en el valor de intensidad correspondiente al valor medio más alto en el pico. La figura 2-14 muestra la FWHM para un pico muestra.

| *Anchura a media altura (FWHM)* |
Estándar utilizado para medir el esparcimiento en el pico de un difractograma, medido en el valor de intensidad correspondiente al valor medio más alto en el pico.

Al leer los valores de $2\theta_1$ y $2\theta_2$ a la FWHM, B se puede determinar a partir de la ecuación

$$B = 0.5(2\theta_2 - 2\theta_1) = \theta_2 - \theta_1 \tag{2.10}$$

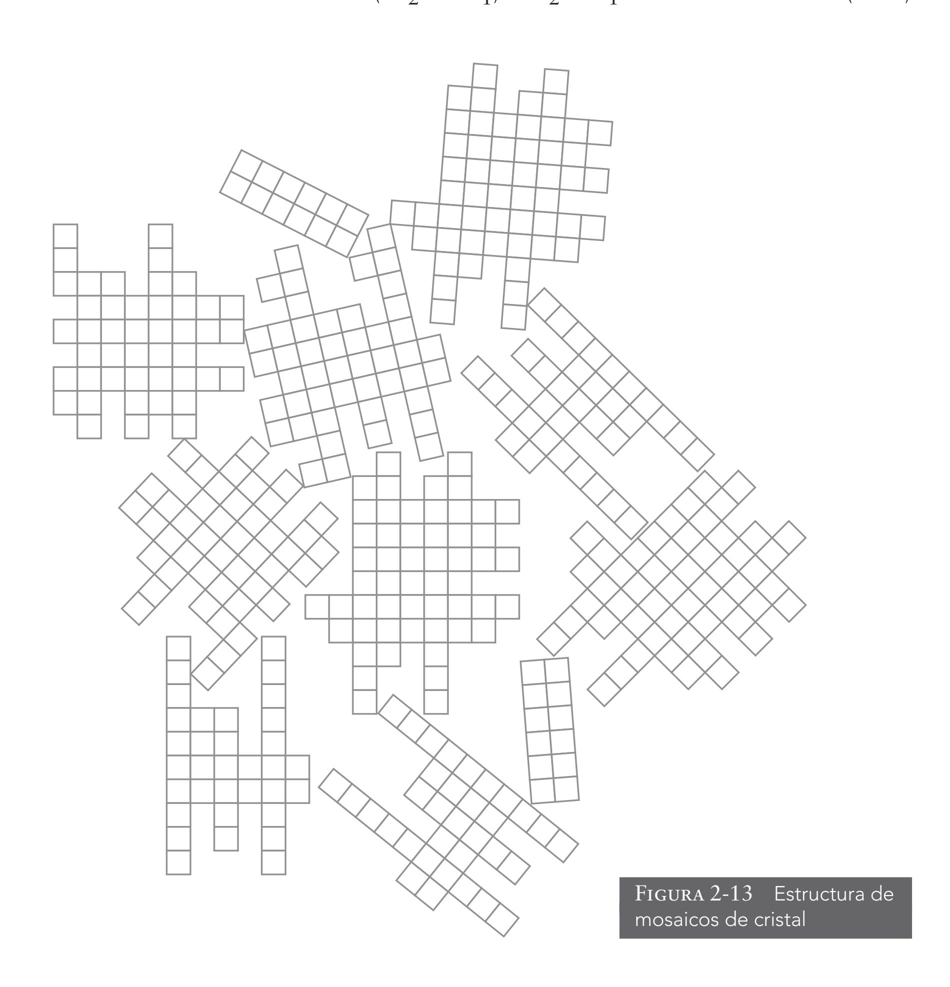


Figura 2-13 Estructura de mosaicos de cristal

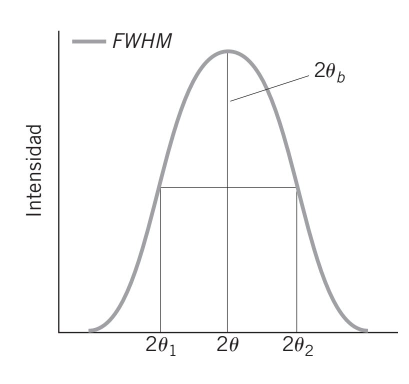


Figura 2-14 Medición de la anchura a media altura

Ejemplo 2-8

Calcular un estimado del espesor de las cristalitas de los planos correspondientes al pico 2 en el ejemplo 2-6 considerando que $2\theta_1 = 28.46$ y $2\theta_2 = 28.98$.

SOLUCIÓN

El espesor de las cristalitas se calcula utilizando la ecuación de Scherrer (2.9), de modo que

$$t = \frac{0.9\lambda}{B \cos \theta_B}$$

$$t = \frac{0.9(.7107\ nm)}{0.5(28.98 - 28.46) \cos (28.72/2)}$$

$$t = 2.54\ nm$$

2.8 MICROSCOPÍA

Con frecuencia, ver las características directamente sería la mejor manera de entender la estructura de un material. Algunas características, incluyendo los tamaños del grano, los defectos grandes en el material, las fracturas y las estructuras presentes en las aleaciones, a veces son visibles para el ojo humano. Sin embargo, a menudo las características de interés son demasiado pequeñas para verlas directamente. En tales casos, el uso del microscopio se hace más valioso.

Existen diversas clases de microscopios y se clasifican por su fuente de luz (u otra radiación). Los microscopios más comunes (presentes en básicamente cualquier laboratorio de ciencias) son microscopios ópticos. Si el material es opaco (por ejemplo, metales, cerámicas y la mayoría de polímeros y compuestos), sólo una superficie se puede examinar microscópicamente, y la luz reflejada que pasa a través de la lente debe revelar la imagen. Para la mayoría de los materiales, la superficie debe ser pulida antes de que cualquier característica significativa sea revelada. Muchos materiales requieren un tratamiento de la superficie mediante un agente grabador para revelar la información. La reactividad entre los agentes grabadores y algunos materiales varía dependiendo de la orientación de sus granos. Se eligen agentes grabadores específicos para que los granos colindantes se afecten diferentemente y el contraste entre los granos sea visible bajo el microscopio óptico.

| ***Microscopía óptica*** | El uso de luz para ampliar objetos hasta 2000 veces.

La ***microscopía óptica*** ofrece diversas ventajas. El equipo es barato y fácil de operar. Las características grandes como los granos y las fracturas son frecuentemente visibles. El software comercial puede calcular el tamaño de cada grano visible. Sin embargo, los microscopios ópticos se limitan a una ampliación de alrededor de 2000x, y muchas de las características que regulan el comportamiento se encuentran en una escala mucho más pequeña.

Cuando la microscopía óptica no es suficiente, los científicos de los materiales optan por la microscopía de electrones. Aquí, en vez de una luz visible, un haz de electrones de alta energía enfocado sirve como la fuente para la imagen. La longitud de onda efectiva de un haz de electrones es de 0.003 nm, permitiendo la resolución de detalles más finos. Están disponibles dos clases de microscopios de electrones que proporcionan diferente información.

Los ***microscopios electrónicos de barrido*** (*SEMs* por sus siglas en inglés o *MEB* en español) compilan el rayo dispersado incidente de los electrones y lo utilizan para proyectar una imagen "chocada" en un monitor, muy parecido a una pantalla de televisión o de computadora. La resolución de los detalles al nivel de submicras es posible con un SEM, y la mayoría de los sistemas son capaces de capturar la imagen digital para impresión o análisis. Las características de las superficies son directamente visibles, lo cual hace al SEM ideal para superficies a la intemperie, aun a una ampliación más baja. Cuando se utiliza el SEM se requiere de alguna habilidad para posicionar y enfocar el rayo. Además, los investigadores deben ser cuidadosos de asegurarse que la porción del material a examinar es suficientemente representativa del material entero. A diferencia de un microscopio óptico, un SEM de alta calidad cuesta varios cientos de miles de dólares.

| ***Microscopio electrónico de barrido (SEM)*** |
Microscopio que enfoca un haz de electrones de alta energía en la fuente y compila el rayo dispersado incidente de estos electrones.

El ***microscopio electrónico de transmisión*** (*TEM* por sus siglas en inglés o *MET* en español) involucra el paso del haz de electrones a través de la muestra y utiliza las diferencias entre la dispersión y la difracción del rayo para dar resolución a una imagen. El TEM es especialmente efectivo para examinar defectos microestructurales. Los TEM pueden ampliar una imagen un millón de veces, pero al igual que los SEM, son extremadamente caros y requieren de algunas habilidades para operarlos. Adicionalmente, la preparación de muestras presenta retos, ya que muchos materiales absorben haces de electrones. Para compensar esto, una película extremadamente delgada de material se debe preparar para su examen y así permitir que una cantidad suficiente del haz de electrones pase. Debido a que el TEM utiliza la difracción de un haz de electrones para unir su información de la imagen, la examinación de los patrones de difracción y dispersión pueden proporcionar información estructural adicional. Los principios de la difracción de electrones son altamente similares a los de la difracción de rayos X, comentados previamente en este capítulo.

| ***Microscopio electrónico de transmisión (TEM)*** |
Microscopio de electrones que pasa el haz de electrones a través de la muestra y utiliza las diferencias entre la dispersión y la difracción del rayo para ver el objeto deseado.

¿Cómo se forman y crecen los cristales?

2.9 NUCLEACIÓN Y CRECIMIENTO DEL GRANO

El crecimiento de cristalitas es un fenómeno de dos etapas. Primero, las regiones de orden pequeñas deben formarse. Estas nanocristalitas se llaman ***núcleos*** y el proceso mediante el cual se forman es la ***nucleación***. Los núcleos se forman al azar. La mayoría son demasiado pequeños para sostenerse y desaparecen rápidamente, pero cuando un núcleo es más grande que algunos valores críticos (típicamente alrededor de 100 átomos), la termodinámica del sistema cambia y el crecimiento adicional se ve favorecido.

La ***nucleación homogénea*** sucede cuando un material puro se enfría lo suficiente como para soportar la formación de núcleos estables. La ***nucleación heterogénea*** resulta cuando las impurezas proporcionan una superficie para que se formen núcleos. La presencia de esta superficie hace mucho más sencillo el fenómeno de nucleación, y sólo unos cuantos átomos son necesarios para lograr el radio crítico. Los núcleos estables en agua congelada no se formarían hasta los –40° C a través de la nucleación homogénea, pero las impurezas permiten que la nucleación suceda a temperaturas mucho más altas. Con la nucleación homogénea o heterogénea, la tasa de nucleación es una función de temperatura.

| ***Núcleos*** |
Pequeños racimos de átomos acomodados que sirven como marco para el subsecuente crecimiento de cristales.

| ***Nucleación*** |
Proceso de formación de pequeños racimos de átomos alineados que sirven como marco para el crecimiento de cristales.

| ***Nucleación homogénea*** |
Formación de racimos que ocurre cuando un material puro se enfría lo suficiente para autosoportar la formación de núcleos estables.

| ***Nucleación heterogénea*** |
Formación de racimos de átomos alrededor de una impureza que proporciona una plantilla para el crecimiento de cristales.

| *Crecimiento del grano* | El segundo paso en la formación de cristalitas, el cual es dependiente de la temperatura y puede ser descrito usando la ecuación de Arrhenius

Una vez que los núcleos estables se han formado, comienza la segunda etapa del proceso: el ***crecimiento del grano***. Como muchas cosas en la ciencia de los materiales, el crecimiento de los granos sigue una relación dependiente de la temperatura llamada ecuación de Arrhenius. Para el crecimiento de los granos,

$$\frac{dG}{dt} = A_0 \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right), \tag{2.11}$$

en donde G es el tamaño de un cristal en crecimiento, t es el tiempo, A_0 es una constante preexponencial que varía con el material, R es la constante de gas, E_A es la energía de activación para la difusión y T es la temperatura absoluta.

Para que suceda el crecimiento de cristalitas, el proceso de nucleación y de crecimiento del grano se debe llevar a cabo. La velocidad de transformación total es el producto de la velocidad de nucleación y de la velocidad de crecimiento.

¿Qué tipos de defectos se presentan en los cristales? ¿A qué afectan?

2.10 DEFECTOS PUNTUALES

| *Defecto puntual* | Defecto en la estructura de un material que sucede en un solo sitio en la red cristalina, como defectos de vacantes, de sustitución e intersticiales.

La mayoría de los análisis sobre estructuras de redes cristalinas se han enfocado en redes cristalinas perfectamente construidas sin defectos de ninguna clase, pero todas las redes cristalinas tienen defectos. Cuando el defecto ocurre en un sitio específico en la red cristalina se llama ***defecto puntual***. Se pueden dar tres clases de defectos: vacantes o de vacancia, de sustitución e intersticiales.

| *Vacantes* | Defectos puntuales que resultan de la ausencia de un átomo en un sitio particular de la red cristalina.

Las ***vacantes*** resultan de la ausencia de un átomo en un sitio de la red cristalina. Los sitios de redes cristalinas vacantes reducen la fuerza y estabilidad de la red cristalina en su totalidad. Afortunadamente, pocas vacantes existen a temperatura ambiente, pero el número de vacantes se incrementa cuando la temperatura aumenta. La temperatura elevada proporciona más energía para los átomos en la red cristalina para romper sus enlaces y difuminarse. La dependencia a la temperatura de las vacantes se regula por una forma de la ***ecuación de Arrhenius***,

| *Ecuación de Arrhenius* | Ecuación generalizada utilizada para predecir la dependencia de temperatura de varias propiedades físicas.

$$N_V = N_0 \exp\left(\frac{-Q_V}{RT}\right), \tag{2.12}$$

en donde N_v es el número de vacantes, N_0 es la constante específica preexponencial del material, R es la constante de gas, T es la temperatura absoluta y Q_v es la energía requerida para iniciar una vacante. Conforme los materiales se acercan a su temperatura de fusión, los rangos de vacancias oscilan frecuentemente en un sitio de la red cristalina por cada 10 000 lugares atómicos.

| *Defectos de sustitucionales* | Defectos puntuales que resultan cuando un átomo en la red cristalina es reemplazado con un átomo de un elemento diferente.

Los ***defectos sustitucionales*** resultan cuando un átomo en el sitio de la red cristalina es reemplazado con un átomo de un elemento diferente. Las sustituciones pueden ser ya sea beneficiosas o dañinas, dependiendo de la clase de sustitución y las propiedades deseadas. Algunas veces las sustituciones son deliberadamente inducidas a un material a través de un proceso llamado *adulteración* (*dopaje*). Como se ve en el capítulo 9, la adulteración es particularmente importante en la fabricación de materiales electrónicos.

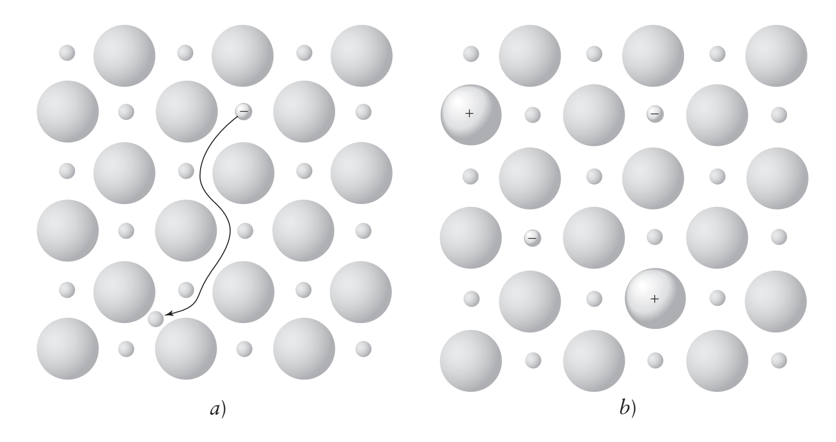


Figura 2-15 *a*) Defecto Frenkel, *b*) defecto Schottky

Los ***defectos intersticiales*** resultan cuando un átomo ocupa un espacio en una red cristalina que normalmente está vacante. En general, el átomo que invade debe ser lo suficientemente pequeño como para caber en un hueco en la red cristalina. Los materiales iónicos y cerámicos están sujetos a una forma especial de defectos intersticiales relacionados con las partículas cargadas. Un ***defecto Frenkel*** resulta del movimiento de un catión hacia un sitio intersticial en la red cristalina, como se muestra en la figura 2-15 (*a*). El resultado de este movimiento es un defecto intersticial de catión y una vacante de catión. Un ***defecto Schottky*** sucede cuando una vacante de catión y una de anión se forman en la red cristalina, como se muestra en la figura 2-15 (*b*). Debido a que el material debe permanecer eléctricamente neutral, una vacante no puede formarse sin la otra.

| ***Defectos intersticiales*** |
Defectos puntuales que suceden cuando un átomo ocupa un espacio que normalmente se encuentra vacante.

| ***Defecto Frenkel*** |
Defecto puntual encontrado en materiales cerámicos que sucede cuando un catión salta hacia un sitio intersticial en la red cristalina.

| ***Defecto Schottky*** |
Defecto puntual que sucede en materiales cerámicos cuando un catión y un anión faltan en una red cristalina.

2.11 DISLOCACIONES

En adición a los defectos puntuales, secciones completas de redes cristalinas se pueden deformar. Estos defectos de gran escala de redes cristalinas se llaman ***dislocaciones*** porque resultan de curvas u ondas en la misma red cristalina. Existen tres tipos principales de dislocaciones: de borde, de tornillo y mixtas. Las ***dislocaciones de borde*** resultan de la adición de una placa de red cristalina parcial extra, como se muestra en la figura 2-16. Los átomos que contactan directamente la dislocación de borde se aprietan muy cerca mientras que aquellos inmediatamente más allá son empujados muy lejos entre sí. La línea que se extiende a través del plano parcial extra de átomos se conoce como ***línea de dislocación***.

Una ***dislocación de tornillo*** resulta del corte y cambio de la red cristalina por un espacio atómico, como se muestra en la figura 2-17.

Las ***dislocaciones mixtas*** resultan cuando una red cristalina contiene dislocaciones de borde y de tornillo con una región de transición discernible entre las dos, como se muestra en la figura 2-18.

La magnitud y dirección de la distorsión de la red cristalina causada por las dislocaciones se representa por un ***vector de Burger*** (*b*) definido por

$$\|b\| = \frac{a}{2}\sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \tag{2.13}$$

| ***Dislocaciones*** |
Defectos de redes cristalinas de gran escala que resultan de las alteraciones a la estructura de la red cristalina.

| ***Dislocaciones de borde*** |
Defectos de redes cristalinas causados por la adición de un plano parcial dentro de una estructura de red cristalina existente.

| ***Línea de dislocación*** |
Línea que se extiende hacia el plano parcial extra de los átomos en una dislocación de borde.

| ***Dislocación de tornillo*** |
Defecto de la red cristalina que sucede cuando la red cristalina es cortada y cambiada por una fila de espacio atómico.

| ***Dislocaciones mixtas*** |
La presencia de dislocaciones de tornillo y de borde separadas por una distancia en la misma red cristalina.

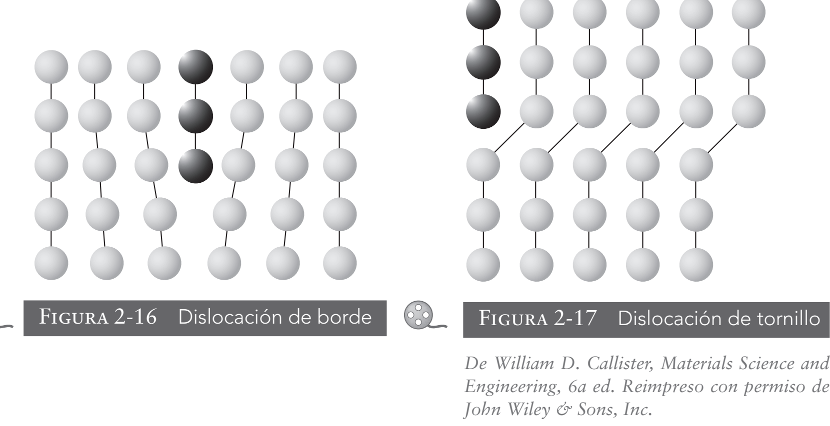


Figura 2-16 Dislocación de borde

Figura 2-17 Dislocación de tornillo

De William D. Callister, Materials Science and Engineering, 6a ed. Reimpreso con permiso de John Wiley & Sons, Inc.

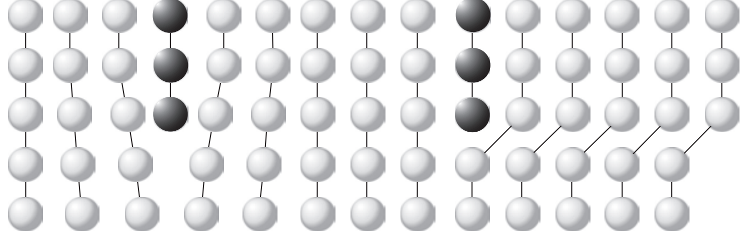


Figura 2-18 Dislocaciones mixtas

Para la mayoría de los metales y otros sistemas de apilamiento compacto, la magnitud del vector de Burger es la misma que el espacio interplanar del material, ya que la red cristalina es normalmente compensada por una unidad. El ***vector de Burger*** y la línea de dislocación forman un ángulo recto en las dislocaciones de borde y son paralelos entre sí en las dislocaciones de tornillo.

| ***Vector de Burger*** |
Representación matemática de la magnitud y dirección de las distorsiones en una red cristalina causadas por dislocaciones.

Las dislocaciones se forman a partir de tres fuentes principales:

1. *Nucleación homogénea*. Enlaces en la ruptura de la espina de la red cristalina, y la red cristalina se recorta, creando dos planos de dislocación enfrentados en direcciones opuestas.

2. *Fronteras de grano*. Los pasos y las salientes presentes en las separaciones entre los granos adyacentes se propagan durante las etapas tempranas de deformación.

3. *Interacciones de red cristalina/superficie*. Los pasos localizados en la superficie del cristal concentran la tensión en pequeñas regiones haciendo más propensa la propagación de la dislocación.

La nucleación homogénea requiere de una tensión concentrada para fracturar los enlaces de la red cristalina y rara vez ocurre espontáneamente; la iniciación de las fronteras de grano y la iniciación de superficie son más fáciles y más comunes.

2.12 DESLIZAMIENTO

Cuando se encuentran bajo tensión cortante, las dislocaciones pueden moverse a través de un material. Las fuerzas cortantes causan enlaces entre los átomos en un plano para romperse. El plano de corte se

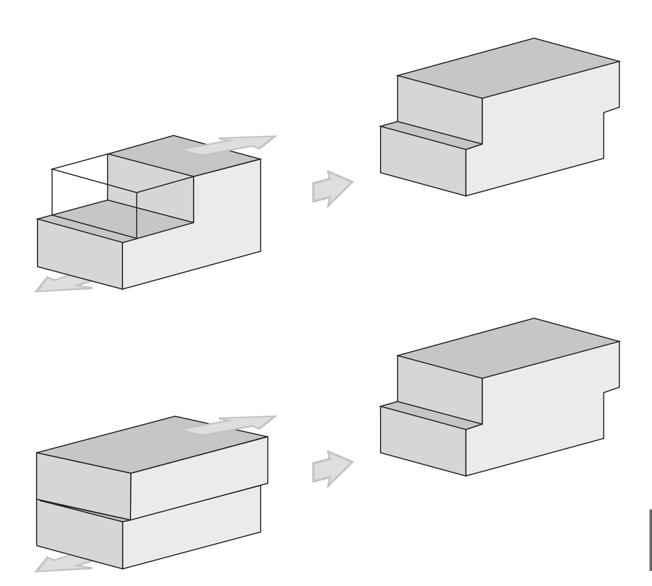


Figura 2-19 Deslizamiento resultante en un cristal deformado.

desplaza ligeramente y se enlaza a los átomos colindantes, provocando que la dislocación se deslice por una longitud atómica. El proceso se repite y resulta en un cristal deformado, como se muestra en la figura 2-19. Al movimiento de dislocaciones a través de un cristal se le llama ***deslizamiento***. Diversos factores impactan el riesgo de deslizamiento:

| *Deslizamiento* | El movimiento de dislocaciones a través de un cristal, causado cuando el material se pone bajo tensión cortante.

- El deslizamiento ocurre más fácilmente cuando los átomos están muy juntos. La tensión requerida para inducir el deslizamiento se incrementa exponencialmente con el incremento del espacio interplanar.
- El deslizamiento requiere de la ruptura de los enlaces, para que los materiales con enlaces covalentes fuertes (como los polímeros) sean resistentes.
- Los materiales con enlaces iónicos (como los óxidos de metal) son resistentes debido a las distancias interplanares más grandes y las repulsiones provocadas cuando las partículas con cargas similares son forzadas a pasar cerca la una de la otra.

La dirección en la que la dislocación se mueve se llama *dirección de deslizamiento,* y los planos impactados por el deslizamiento se llaman ***planos de deslizamiento***. Los planos de deslizamiento y la dirección de deslizamiento forman el ***sistema de deslizamiento***. Se requiere de una energía suficiente como para romper los enlaces y mover los átomos para que suceda el deslizamiento, y la dislocación se moverá en la dirección que requiera la menor energía. Diferentes configuraciones de redes cristalinas tienen sistemas de deslizamiento específicos que son más propensos a formarse. La tabla 2-6 resume los sistemas de deslizamiento para las redes cristalinas FCC, BCC y HCP.

| *Planos de deslizamiento* | Los nuevos planos formados después de que el material ha sido objeto de deslizamiento.

| *Sistema de deslizamiento* | Compuesto por el plano de deslizamiento y la dirección de deslizamiento.

Para que suceda un deslizamiento, una cantidad suficiente de tensión deberá ser aplicada para deformar permanentemente el material. Este nivel de tensión, llamado *esfuerzo de deformación* (σ_y), se analiza más a fondo en el capítulo 3. Cuando dicha tensión es aplicada en un material, es poco probable que la fuerza esté actuando en la dirección del plano de deslizamiento. Hasta que un umbral de tensión crítico sea alcanzado para un conjunto dado de planos de deslizamiento, las dislocaciones no podrán deslizarse. La figura 2-20

Tabla 2-6 Sistemas de deslizamiento presentes en diferentes redes cristalinas

Tipo de red cristalina	*Planos de deslizamiento*	*Dirección de deslizamiento*
BCC	(1 1 0)	[1 1 1]
	(1 1 2)	
	(1 2 3)	
FCC	(1 1 1)	[1 1 0]
HCP	(0 0 0 1)	[1 0 0]

ayuda a ilustrar el concepto. Si ϕ representa el ángulo entre la tensión aplicada y la normal para el plano de deslizamiento y λ representa el ángulo entre la fuerza y la dirección de deslizamiento, la ***ley de Schmid*** dicta que la ***tensión crítica cortante resuelta*** (τ_c) que se necesita para que ocurra el deslizamiento en cualquier sistema de deslizamiento está definida como

| ***Ley de Schmid*** | Ecuación utilizada para determinar la tensión cortante crítica resuelta en un material.

| ***Tensión crítica cortante resuelta*** | Nivel de tensión más bajo en que el deslizamiento comenzará en un material.

$$\tau_c = \sigma_y \cos\phi \cos\lambda \tag{2.14}$$

Un material puede contener muchos sistemas de deslizamiento diferentes, cada uno de los cuales tendría una tensión crítica cortante resuelta necesaria para iniciar el deslizamiento. El sistema con la τ_c más baja con respecto a la dirección de una fuerza aplicada específica será lo primero para experimentar el deslizamiento y se llama ***sistema primario de deslizamiento***. Si la tensión se continúa incrementando, los sistemas de deslizamiento adicionales podrían sobrepasar su τ_c y el deslizamiento comenzará en esos sistemas también.

| ***Sistema primario de deslizamiento*** | Primer conjunto de planos de un material en experimentar un deslizamiento bajo una tensión aplicada.

Si un material en su totalidad estuviera compuesto de un solo cristal, las dislocaciones podrían moverse a través de todo el material. Sin embargo, la mayoría de los materiales reales tienen una estructura de mosaico de cristal con cristalitas o granos más pequeños. Los átomos no están debidamente espaciados en la frontera entre los granos adyacentes y el deslizamiento no puede continuar. Cuando un defecto se propaga a través de un material, se detiene (o al menos se hace significativamente más lento) cuando llega a una frontera de grano. Los materiales con granos más grandes son más afectados por el deslizamiento, así que por lo general los granos más pequeños son los más preferidos. Los granos más pequeños llevan mayor fuerza. La ***ecuación de Hall-Petch*** se

| ***Ecuación de Hall-Petch*** | La correlación utilizada para calcular el límite elástico de un material dado basado en el tamaño del grano.

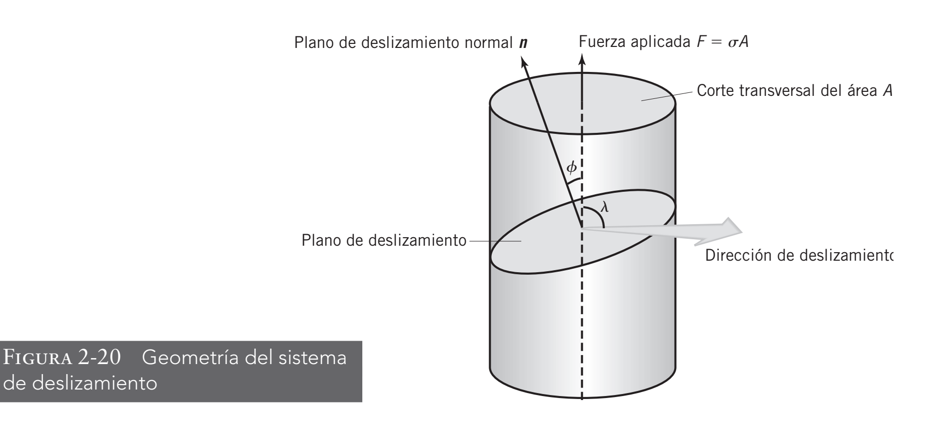


Figura 2-20 Geometría del sistema de deslizamiento

puede utilizar para calcular el límite elástico (σ_y) de un material dado basado en el tamaño del grano:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{K_y}{\sqrt{d}}, \tag{2.15}$$

en donde σ_0 es la tensión de fricción que se opone al movimiento de las dislocaciones y K_y es la medida de la extensión del apilamiento de dislocaciones frente a las barreras y d es el diámetro promedio de un grano. La Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) proporciona un método estándar para la caracterización de tamaños de granos. Define el ***número de tamaño del grano*** (G) como

$$N = 2^{G-1}, \tag{2.16}$$

en donde N es el número de granos observados en un área de una pulgada cuadrada a una amplificación de 100x. La ecuación 2.14 se puede escribir para resolver directamente G:

$$G = 1.443 \ln (N) + 1. \tag{2.17}$$

| *Número de tamaño del grano* |
Una cantidad numérica desarrollada por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) para caracterizar los tamaños de granos en los materiales.

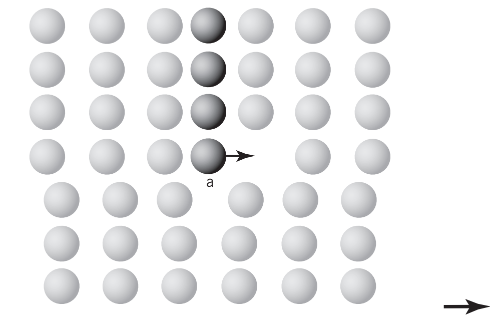
2.13 TREPADO DE LA DISLOCACIÓN

El ***trepado de la dislocación*** es otro mecanismo mediante el cual una dislocación se puede propagar a través de una red cristalina. A diferencia del deslizamiento, el trepado de la dislocación permite que la dislocación se mueva en direcciones perpendiculares al plano de deslizamiento. Las vacantes en la red cristalina son la clave para el trepado de la dislocación. Como se analizó en la sección 2.10, las vacantes se pueden mover a través de la red cristalina. Cuando una vacante se mueve a un sitio adyacente al plano parcial de átomos en una dislocación de borde, el átomo más cercano en el plano parcial puede llenar el sitio vacante, y una nueva vacante se forma en el plano parcial como se muestra en la figura 2-21. Se dice entonces que el átomo ha hecho un ***trepado positivo***. El cristal se encoge en la dirección perpendicular al plano parcial extra debido a la eliminación del átomo extra. La vacante ahora presente en el plano parcial puede ser reemplazada por un átomo en el otro lado. En este caso, el cristal crece en la dirección perpendicular al plano parcial debido a que un nuevo átomo se ha añadido al plano parcial. A esto se le llama un ***trepado negativo***. Los trepados positivo y negativo son fuertemente afectados por la temperatura, porque el incremento de la temperatura incrementa la velocidad a la que las vacantes se mueven dentro de la red cristalina. Las tensiones compresoras favorecen el trepado positivo mientras que la resistencia a la tensión favorece el trepado negativo.

| *Trepado de la dislocación* |
Mecanismo mediante el cual las dislocaciones se mueven en direcciones perpendiculares al plano de deslizamiento.

| *Trepado positivo* |
El llenado de una vacante en el plano parcial de una dislocación de borde mediante un átomo adyacente resultante en el encogimiento del cristal en la dirección perpendicular al plano parcial.

| *Trepado negativo* |
El llenado de una vacante en el plano parcial de la dislocación de un borde mediante un átomo adyacente resultante en el crecimiento del cristal en la dirección perpendicular al plano parcial.



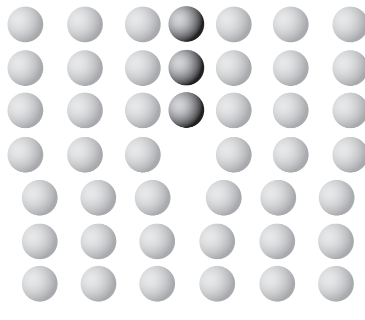


Figura 2-21 Trepado de dislocación positivo

¿Qué nuevos desarrollos se han logrado con los cristales y las estructuras de los cristales?

2.14 MONOCRISTALES Y NANOCRISTALES

Hasta el momento, los materiales tratados en este capítulo han tenido muchas regiones de cristalinidad separadas por fronteras de grano. Las regiones entre las cristalitas bloquean el deslizamiento e incrementan la resistencia de los materiales pero también puede tener efectos adversos. Las malas alineaciones de las cristalitas impactan las propiedades eléctricas locales de los materiales semiconductores y harían que muchos de los avances en microelectrónica fueran imposibles. Para sobrepasar esta dificultad, los científicos y los ingenieros han desarrollado cristales únicos, o ***monocristales***, en los que el material total consiste de un grano único e indivisible.

| ***Monocristales*** | Materiales en los que la estructura total es un grano único e indivisible.

Los cristales únicos se forman al construir el cristal mediante una capa de átomos a la vez. Típicamente, un sólido ordenado muy pequeño llamado *semilla de cristal* es sumergido en una solución fundida del material relevante. La semilla de cristal proporciona un marco para que los nuevos átomos lo sigan. Mediante el control cuidadoso de los gradientes de temperatura y otras variables del proceso, pueden producirse cristales únicos relativamente grandes, o ***boules***. Aunque las aplicaciones de alta calidad, como la formación de semiconductores de cristal único, requieren condiciones de ambiente limpio, materiales de alta pureza y control excepcional de las variables de proceso, el mismo concepto básico se utiliza en aplicaciones más mundanas como el desarrollo de roca de azúcar. Los cristales únicos perfectos son extremadamente poco comunes en la naturaleza, pero las boules sintéticas pueden crecer a más de un metro de longitud.

| ***Boules*** | Monocristales grandes producidos de forma artificial.

En adición a sus propiedades eléctricas mejoradas, los cristales únicos tienen también ventajas ópticas importantes. Las fibras de cristal único de zafiro con pérdidas ópticas de hasta 0.3 dB/m se encuentran en producción comercial. Los cristales únicos tienen desventajas de relevancia. Son caros para producirse y son extremadamente susceptibles a los defectos. Debido a que no existen fronteras de grano, los defectos son capaces de propagarse a través

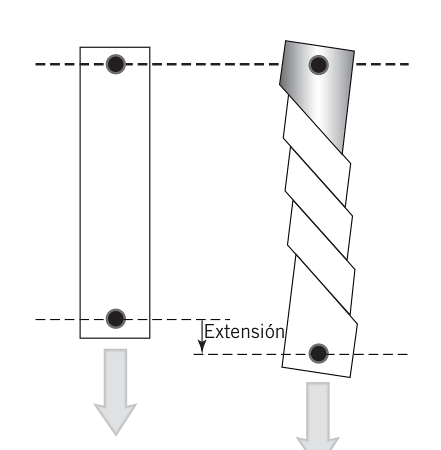


Figura 2-22 Ilustración del deslizamiento en sistemas de cristal único

de todo el material, reforzando significativamente la probabilidad de falla. El deslizamiento en estos sistemas sucede en planos paralelos, como se muestra en la figura 2-22.

Los ***nanocristales***, materiales cristalinos con tamaños de nanómetros en longitud, representan una revolución tecnológica en potencia. Estos materiales normalmente varían de unos pocos cientos a varios miles de átomos en tamaño. Como resultado, son más grandes que la mayoría de las moléculas, pero mucho más pequeños que los sólidos cristalinos típicos. Los nanocristales tienen propiedades termodinámicas y eléctricas excepcionales que caen entre las de las moléculas individuales y los sólidos más grandes. Su rango potencial de aplicaciones va desde la óptica hasta la electrónica, la catálisis y la imagen.

| ***Nanocristales*** |
Materiales cristalinos con tamaños de nanómetros en longitud.

Debido a que los nanocristales son tan pequeños, son mucho menos susceptibles a los defectos que los materiales más grandes, y la mayoría de sus propiedades se pueden controlar al controlar su tamaño. Los átomos únicos pueden ser atrapados dentro de los nanocristales, reforzando relevantemente las propiedades luminiscentes del átomo. Esto abre la puerta para la creación de una gama de aplicaciones ópticas y magnéticas, muchas de las cuales apenas se están desarrollando. Los nanocristales ya se utilizan en celdas solares fotovoltaicas que parecen ser más eficientes que las celdas tradicionales. Los nanocristales también ofrecen proporciones extremadamente altas de volumen-superficie, lo cual los hace ideales para muchas aplicaciones de catálisis. Algunas empresas petroleras ahora utilizan nanocristales en sus procesos de producción de combustible diesel.

Resumen del capítulo 2



En este capítulo se examinaron:

- Las estructuras presentes en los materiales cristalinos.
- Cómo caracterizar las estructuras.
- Cómo representar planos y direcciones utilizando los índices de Miller.
- Cómo utilizar estos conceptos para calcular las densidades y otras propiedades de los materiales.
- Cómo la difracción de rayos X revela la estructura de cristal de los materiales.
- Cómo la microscopía puede identificar características adicionales.
- Cómo los cristales se forman y crecen.
- Cómo las redes cristalinas reales difieren de las ideales.
- Qué defectos existen en las redes cristalinas.
- Cómo se mueven los defectos a través de las redes cristalinas mediante el deslizamiento y el trepado de la dislocación.
- El papel y la importancia de las fronteras de grano.
- Las diferencias entre cristales, cristales únicos y nanocristales.

Términos clave

anchura a media altura FWHM *p. 51*
arreglo atómico *p. 33*
boules *p. 60*
celda unitaria *p. 36*
condiciones extintas *p. 47*
crecimiento del grano *p. 54*
cristalitas *p. 50*
cúbica centrada en el cuerpo (BCC) *p. 34*
cúbica simple *p. 34*
defecto Frenkel *p. 55*
defecto puntual *p. 54*
defecto Schottky *p. 55*
defectos intersticiales *p. 55*
defectos sustitucionales *p. 54*
densidad teorética *p. 40*
deslizamiento *p. 57*
difracción *p. 46*
dislocación de tornillo *p. 55*
dislocaciones *p. 55*
dislocaciones de borde *p. 55*
dislocaciones mixtas *p. 55*
ecuación de Arrhenius *p. 54*
ecuación de Bragg *p. 46*
ecuación de Hall-Petch *p. 58*
ecuación de Scherrer *p. 50*
espacio interplanar *p. 45*
estructura atómica *p. 33*
estructura cúbica de caras centradas (FCC) *p. 34*
estructura de cristal *p. 33*
factor de paquete atómico (APF) *p. 37*
fronteras de grano *p. 50*
índices de Miller *p. 43*
interferencia constructiva *p. 46*
interferencia destructiva *p. 46*
ley de Schmid *p. 58*
línea de dislocación *p. 55*
macroestructura *p. 33*
materiales amorfos *p. 33*
microestructura *p. 33*
microscopía óptica *p. 52*
microscopio electrónico de barrido (SEM) *p. 53*
microscopio electrónico de transmisión (TEM) *p. 53*
monocristales *p. 60*
mosaico de cristal *p. 50*
nanocristales *p. 61*
nucleación *p. 53*
nucleación heterogénea *p. 53*
nucleación homogénea *p. 53*
núcleo *p. 53*
número de tamaño del grano *p. 59*
paquete cerrado hexagonal (HCP) *p. 34*
parámetros de redes cristalinas *p. 36*
planos de deslizamiento *p. 57*
redes cristalinas de Bravais *p. 33*
sistema primario de deslizamiento *p. 58*
sistemas de deslizamiento *p. 57*
tensión crítica cortante resuelta *p. 58*
trepado de la dislocación *p. 59*
trepado negativo *p. 59*
trepado positivo *p. 59*
vacantes *p. 54*
vector de Burger *p. 56*

Problemas de tarea

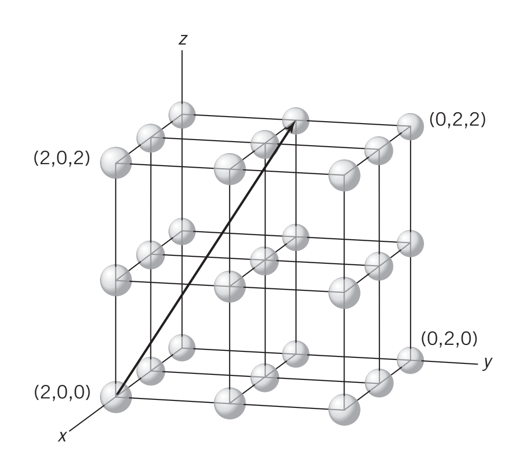
1. La densidad teorética del iridio es de 22.65 g/cm^3 mientras que la densidad teorética del osmio es de 22.61 g/cm^3. Sin embargo, el osmio experimentalmente es más denso que el iridio. Explique brevemente cómo es que este fenómeno puede ocurrir.

2. Calcule la densidad teorética de la plata a 20° C.

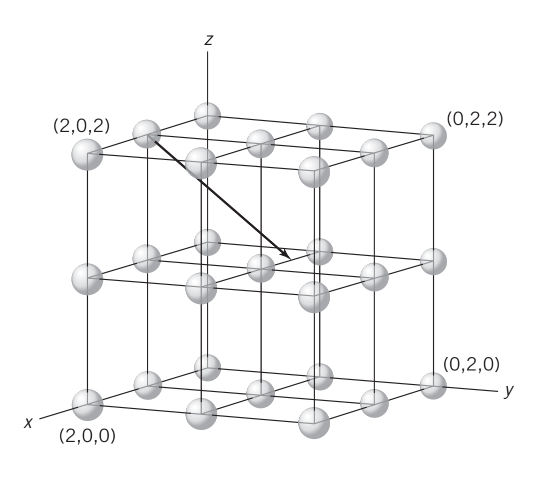
3. El parámetro de la red cristalina del molibdeno es de 0.314 nm y su densidad a 20° C es de 10.22 g/cm^3. Determine la estructura del cristal del molibdeno.

4. Determine los índices para las siguientes direcciones:

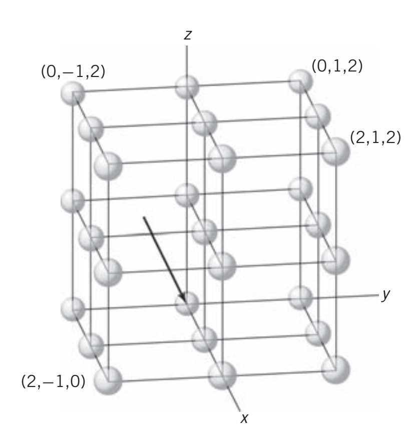
a)



b)

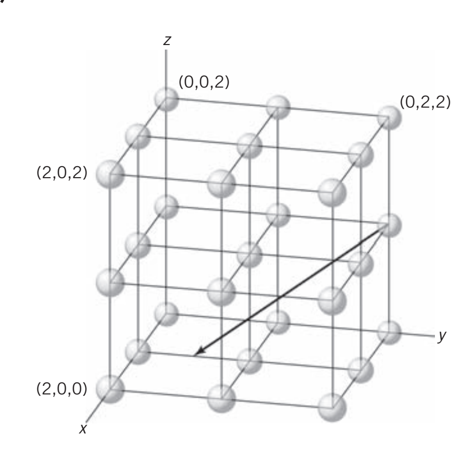


c)

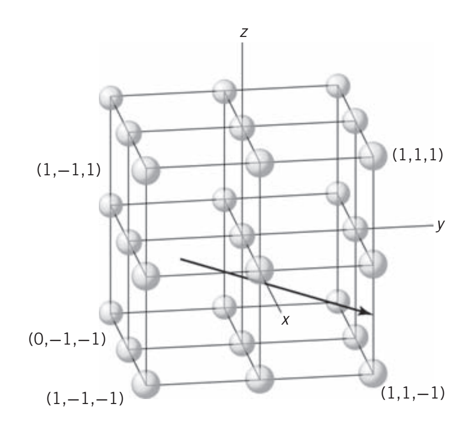


5. Determine los índices para las siguientes direcciones:

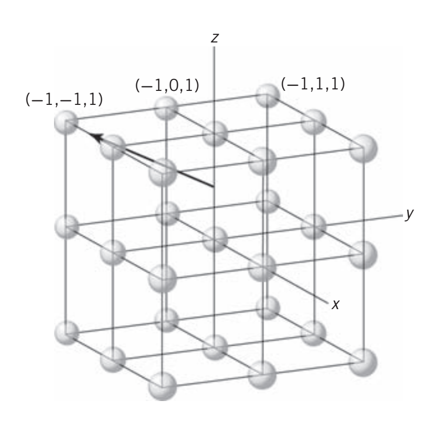
a)



b)



c)



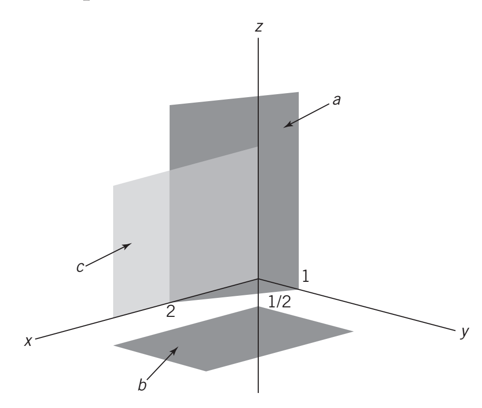
6. Dibuje las direcciones cristalográficas definidas por los siguientes índices:

a) [1 0 2] *b)* $[0\ \bar{1}\ 1]$ *c)* $[\bar{2}\ 3\ \bar{1}]$

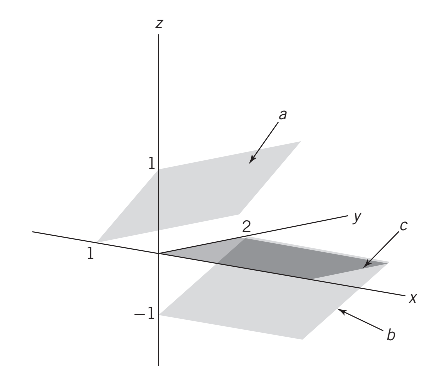
7. Dibuje las direcciones cristalográficas definidas por los siguientes índices:

a) [0 1 2] *b)* $[\bar{1}\ \bar{1}\ 1]$ *c)* $[2\ 0\ \bar{2}]$

8. Determine los índices de Miller para los siguientes planos:



9. Determine los índices de Miller para los siguientes planos:



10. En un conjunto de ejes de coordenadas, dibuje los planos que corresponden a los siguientes conjuntos de índices de Miller:

a) (1 0 0) *b)* $(\bar{2}\ 0\ 1)$ *c)* (1 2 1)

11. En un conjunto de ejes de coordenadas, dibuje los planos que corresponden a los siguientes conjuntos de índices de Miller:

a) (0 2 0) *b)* $(\bar{2}\ 0\ 1)$ *c)* $(\bar{1}\ \bar{2}\ 1)$

12. La velocidad de crecimiento de un grano de material dado es de 10 nm/min a 293 K y 150 nm/min a 323 K.

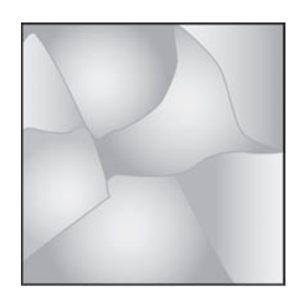
a) Determine la energía de activación y constante preexponencial.

b) Calcule la velocidad de crecimiento del grano a 310 K.

13. La energía de activación para el crecimiento de grano de un material específico es de 15 kj/mol y la constante preexponencial es de 1000 nm/min. ¿Qué temperatura sería necesaria para lograr una velocidad de crecimiento de grano de 2.44 nm/min?

14. Un estudiante de licenciatura le comenta que ha observado un defecto Schottky en una muestra de aluminio puro. Explique porqué a este estudiante le tomará mucho tiempo obtener su doctorado.

15. La siguiente imagen representa una pulgada cuadrada a una ampliación de 100x. Determine el número de tamaño del grano para el material.



16. ¿Cuántos granos estarían presentes en una muestra de una pulgada cuadrada a una ampliación de 100x para un material con un número de tamaño del grano de 4?

17. Durante un experimento de difracción de rayos X (λ = 0.7107 Å), un pico de difracción aparece a 37.3° y otro a 46.2°. A falta de cualquier otra información, ¿cuál de los dos planos espe-

raría que fuera más susceptible al deslizamiento? Explique su respuesta.

18. El límite elástico de un material es de 400 lb/plg^2 cuando el diámetro de grano promedio es de 0.22 pulgadas y se incrementa a 450 lb/plg^2 cuando el diámetro de grano es de 0.15 pulgadas. ¿Cuál diámetro de grano daría un límite elástico de 500 lb/plg^2?

19. ¿Podría un material con una estructura de red cristalina BCC, FCC o HCP ser más propenso a los defectos intersticiales? Explique su respuesta.

20. Una fuente de rayos X (λ = 0.7107 Å) se utiliza para examinar una muestra en polvo. Si el espacio interplanar para un plano dado es de 1.35 angstroms, la distancia entre los átomos en el plano es de 1.91 angstroms y el grosor promedio de la cristalita es de 12 angstroms.

a) Determine el ángulo de incidencia que corresponderá al pico de difracción.

b) Calcule el esparcimiento del pico a la anchura a media altura.

c) Proporcione un conjunto potencial de índices de Miller para este plano.

d) Dibuje el plano (en un conjunto de ejes de coordenadas).

21. Una fuente de rayos X (λ = 0.7307 Å) es radiada hacia una muestra en polvo de un material con una estructura FCC. El espacio interplanar que corresponde al primer pico de difracción es de 3.40 angstroms.

a) Determine los valores 2θ para los primeros cinco picos de difracción de esta muestra.

b) Si el esparcimiento en el segundo pico a FWHM es de $2\theta = 0.20°$, determine el espesor promedio de cristalitas.

22. Una fuente de rayos X (λ = 0.7307 Å) se utiliza para examinar una aleación metálica desconocida. Los picos de difracción resultantes se resumen en la siguiente tabla. La prueba de la aleación utilizando el principio de Arquímedes muestra que la densidad del metal es de 17.3g/cm^3. Determine el peso molecular promedio de la aleación.

Número de pico	2θ
1	21.04
2	24.34
3	34.70
4	40.93
5	42.84
6	49.88

23. Los índices de Miller para un plano (uno de muchos) en una muestra son (2 1 0).

a) Dibuje el plano que corresponde al primer pico de difracción de rayos X que aparecería para esa muestra. Nota: El plano (2 1 0) puede no ser el primero.

b) Si el parámetro de la red cristalina del material es de 1.54 angstroms y se utiliza una fuente de 0.7307 angstroms, determine el espacio interplanar del plano (2 1 0).

c) Si la densidad del material es de 7.88 g/cm^3, ¿cuál es el peso molecular de la muestra?

24. Si una resistencia a la tensión se aplica a una muestra cristalina, ¿cuál de los planos de deslizamiento descritos en la siguiente tabla sería el plano de deslizamiento primario?

Plano	*Ángulo entre la resistencia aplicada y la normal al plano de deslizamiento*	*Ángulo entre la resistencia y la dirección de deslizamiento*
A	20.7°	77.0°
B	4.2°	33.7°
C	63.5°	20.4°

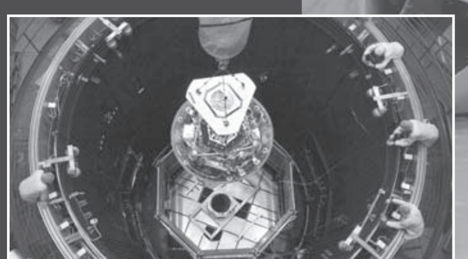
25. Explique porqué diferentes planos dentro de la misma red cristalina tendrían distintos valores de τ_c.

26. ¿Por qué el ángulo de la tensión aplicada cambia el plano de deslizamiento principal de una red cristalina?



Medición de las propiedades mecánicas

AP/Wide World Photos









C O N T E N I D O

Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el alumno debe ser capaz de:

- Saber cómo encontrar y leer una norma ASTM para un ensayo específico.
- Calcular la resistencia a la tracción, el módulo de tracción, la resistencia a la ruptura, el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, resistencia a la conformación, y la tensión y la deformación reales a partir de datos de ensayos de tracción.
- Identificar y definir las regiones del estiramiento elástico y de la deformación plástica.
- Calcular la resistencia a la conformación compensatoria para un material sin ninguna transición clara entre el estiramiento elástico y la deformación plástica.
- Explicar la operación de un ensayo de dureza.
- Convertir los resultados de los ensayos de dureza a las diferentes escalas.
- Explicar en sus propias palabras la diferencia entre una fractura por fragilidad y una por ductilidad.

- Calcular los factores de intensidad de la tensión y determinar si una grieta se propagará o no.
- Comentar los factores que impactan la intensificación de la tensión en una punta de la grieta.
- Explicar las bases físicas de la fluencia y el procedimiento para el ensayo de fluencia.
- Explicar el procedimiento para el ensayo de compresión y por qué algunas veces se debe utilizar el ensayo de recuperación.
- Calcular la resistencia a la flexión y el módulo de flexión derivado de un ensayo de plegado.
- Calcular las barras de error adecuadas para datos experimentales.
- Determinar si dos medias son estadísticamente diferentes.
- Calcular el límite de resistencia y la fatiga a partir de un ensayo de fatiga.
- Explicar el proceso para conducir un estudio de envejecimiento acelerado y las limitantes de sus resultados.

¿Cómo se miden las propiedades?

3.1 NORMAS ASTM

La medición de las propiedades mecánicas es un factor esencial para determinar la adaptabilidad de un material específico para una función específica. Sin embargo, cuando las propiedades son medidas por diferentes investigadores en diferentes laboratorios, existe un potencial de inconsistencias en las técnicas y en los resultados. Para reducir este problema, se han establecido normas para llevar a cabo los ensayos, medir los datos y reportar los resultados.



La ASTM International, antes conocida como la American Society for Testing and Materials (ASTM), ha publicado más de 12 000 normas para las pruebas de materiales. Aunque el cumplimiento de estas normas es voluntario, éstas proporcionan una descripción detallada de los procedimientos para las pruebas que aseguran que los resultados de diferentes laboratorios sean directamente comparables. Las ***normas ASTM*** se pueden encontrar y comprar en línea (www.astm.org), a través de un libro anual de 77 volúmenes sobre normas, o a través de la compilación en CD-ROM. En la tabla 3-1 se muestra una lista representativa sobre las normas para las técnicas de ensayo comentadas en este capítulo.

| ***Normas ASTM*** | Lineamientos publicados por la American Society for Testing and Materials que proporcionan los procedimientos detallados para los ensayos a fin de asegurar que los realizados en diferentes laboratorios sean directamente comparables.

Las normas ASTM inician con un comentario acerca de su campo, seguidas por una lista de documentos referidos. Definen la terminología y resumen los métodos de ensayo incluyendo su significado, uso e interferencias. La mayoría incluyen una descripción detallada de aparatos de ensayo con ilustraciones. También se proporcionan las instrucciones para preparar especímenes de prueba, la calibración del equipo y el acondicionamiento del ambiente. Asimismo, se proporcionan los procedimientos experimentales detallados y las instrucciones para realizar los cálculos.

Tabla 3-1 Normas ASTM más representativas para los métodos de ensayo descritos en este capítulo

Tipo de ensayo	*Norma ASTM correspondiente*
Tracción, superficies de concreto	C1355
Tracción, materiales metálicos	E8M
Tracción, compuestos de matriz metálica	D3552
Tracción, compuestos de matriz polimérica	D4762
Tracción, fibras textiles sencillas	D3822
Compresión, metales	E209
Compresión, cerámicas de fibra reforzada	WK3484
Compresión concreto	C116
Compresión, compuestos	D3410
Ensayo de plegado, cerámicas	C1421
Dureza Brinell	E10
Dureza Rockwell	E18
Fluencia, cerámicas	C1291
Fractura de fluencia, metales	E139
Crecimiento de una grieta por fluencia, metales	E1457
Impacto Izod, plásticos mellados	D256
Impacto de Charpy, plásticos mellados	D6110
Prueba de fatiga en materiales homogéneos	E606

¿Qué propiedades se pueden medir y qué indican?

Existen muchas pruebas que enlistar (y poco descritas) en un texto de introducción. En cambio, esta sección se enfoca en los ocho ensayos más comunes e importantes realizados en una amplia variedad de materiales: ensayo de tracción, ensayo de compresión, ensayo de plegado, ensayo de dureza, ensayo de fluencia, ensayo de impacto, ensayo de fatiga y el envejecimiento acelerado. Aun cuando en estos ocho ensayos fundamentales existen infinidad de variaciones en la operación dependiendo del equipo disponible, del material a ensayar y de muchos otros factores. Para cada método de ensayo, el principio de operación básico se describe junto con los comentarios sobre lo que dicen los datos acerca del material. En la tabla 3-2 se proporciona una breve sinopsis de cada ensayo.

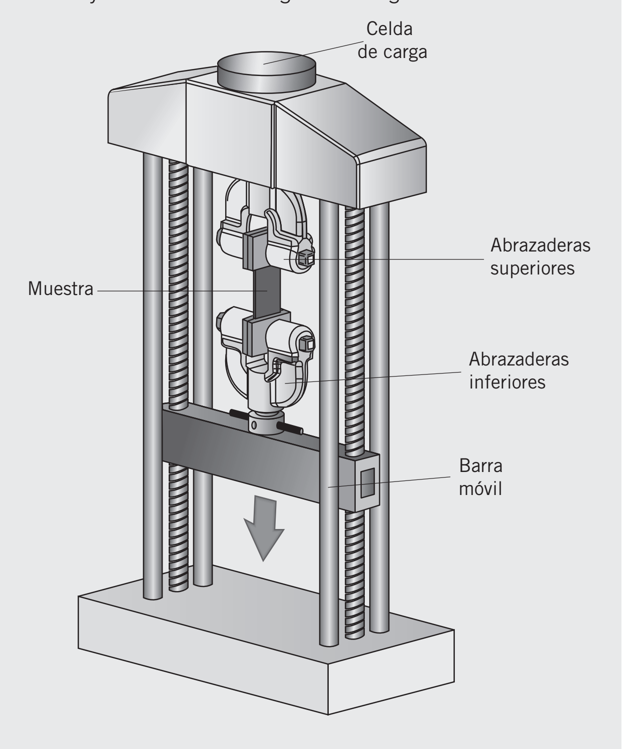
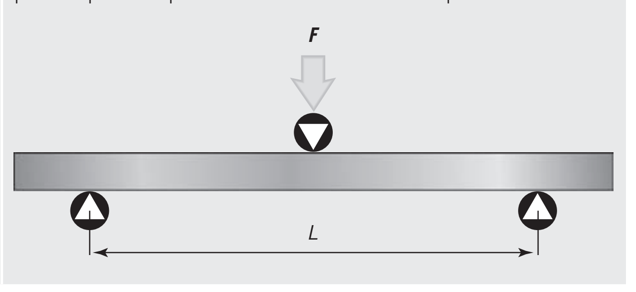
3.2 ENSAYO DE TRACCIÓN

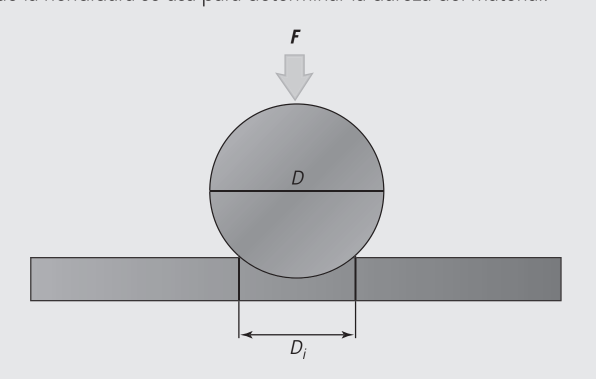
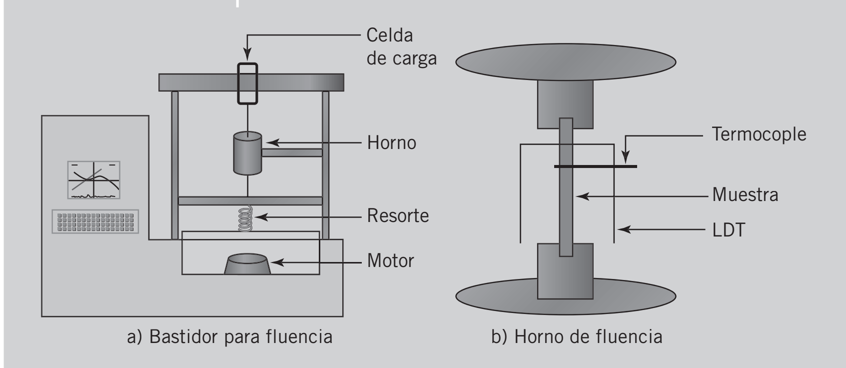
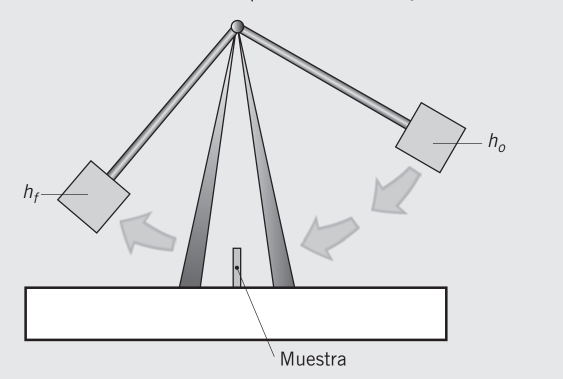
Los ensayos de tracción ofrecen una riqueza de información acerca del material. Aunque una variedad de normas específicas de la ASTM regulan los procedimientos exactos de ensayos para las diferentes clases de materiales, como se muestra en la tabla 3-1, todos utilizan los mismos principios básicos de operación. La muestra del material se asegura entre un par de

| Ensayo de tracción | Método utilizado para determinar la resistencia a la tracción, la resistencia a la ruptura y la resistencia a la conformación de una muestra.

| Ensayo de plegado | Método utilizado para medir la resistencia a la flexión de un material.

Tabla 3-2 Resumen de los métodos de ensayo

Ensayo de tracción	El material de muestra se asegura entre un par de abrazaderas. La abrazadera superior está sujeta a una barra fija y a una celda de carga. La abrazadera inferior está sujeta a una barra móvil que lentamente empuja el material hacia abajo. La celda de carga registra la fuerza y el extensiómetro registra el alargamiento de la muestra. 
Ensayo de compresión	Utiliza el mismo aparato para el ensayo de tracción, pero en vez de separar la muestra, la muestra está sujeta a una carga aplastante. Varios materiales muestran módulos y resistencias de compresión y tracción similares, por lo que las pruebas de compresión muchas veces no se realizan, excepto en casos en los que se espera que el material soporte grandes fuerzas de compresión. Sin embargo, la resistencia a la compresión de muchos polímeros y compuestos son significativamente diferentes de su resistencia a la tracción.
Ensayo de plegado	Se utiliza para probar materiales frágiles. En el momento que la muestra comienza a deformarse bajo una fuerza aplicada, la parte inferior experimenta una tensión a la tracción mientras que la parte superior experimenta una tensión de compresión. 

Ensayo de dureza	Existen docenas de técnicas para medir la dureza, pero la más común es el ensayo Brinell, en donde una esfera de carburo de tungsteno de 10 mm de diámetro se empuja hacia la superficie del material de ensayo utilizando una fuerza controlada. El tamaño de la hendidura se usa para determinar la dureza del material. 
Ensayo de fluencia	La fluencia se refiere a la deformación plástica de un material con el paso del tiempo (generalmente a elevadas temperaturas). Cuando una tensión continua se aplica al material a elevadas temperaturas, se podrá estirar hasta fallar bajo la resistencia a la tensión. Finalmente, la fluencia ocurre debido a dislocaciones del material. Muchos materiales, incluyendo algunos polímeros y soldaduras, experimentan fluencia a temperaturas relativamente bajas.  a) Bastidor para fluencia b) Horno de fluencia
Ensayo de plegado	La tenacidad define la resistencia del material a un golpe. En un ensayo de impacto, un martillo se asegura a un péndulo a una altura inicial y es liberado. La orientación de la muestra varía dependiendo de las técnicas específicas del ensayo. 

| *Ensayo de dureza* | Método utilizado para medir la resistencia de la superficie de un material a la penetración por medio de un objeto duro bajo una fuerza estática.

(continúa)

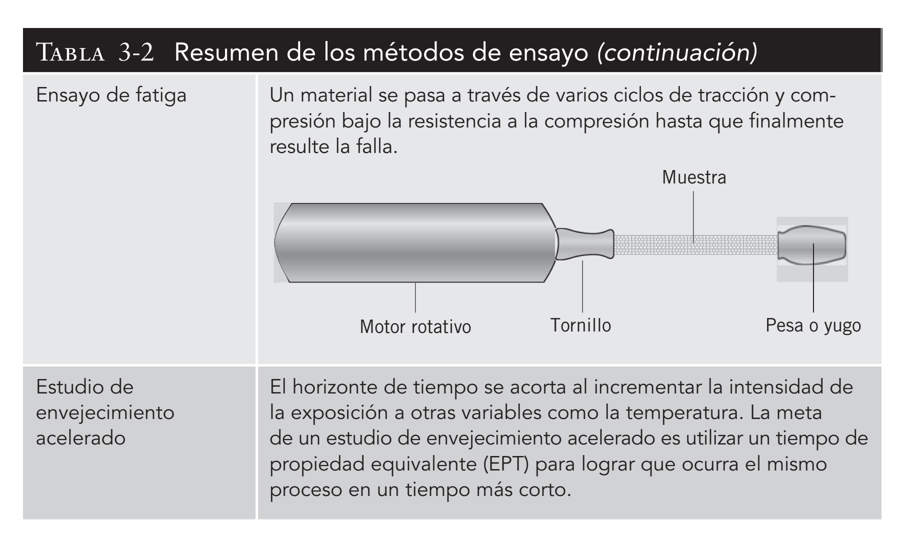


Tabla 3-2 Resumen de los métodos de ensayo *(continuación)*

Ensayo de fatiga	Un material se pasa a través de varios ciclos de tracción y compresión bajo la resistencia a la compresión hasta que finalmente resulte la falla.
Estudio de envejecimiento acelerado	El horizonte de tiempo se acorta al incrementar la intensidad de la exposición a otras variables como la temperatura. La meta de un estudio de envejecimiento acelerado es utilizar un tiempo de propiedad equivalente (EPT) para lograr que ocurra el mismo proceso en un tiempo más corto.

abrazaderas. La abrazadera superior está sujeta a una barra fija y una celda de carga.

La abrazadera inferior está sujeta a una barra móvil que lentamente jala el material hacia abajo. La celda de carga registra la fuerza y un extensiómetro registra el alargamiento de la muestra. La figura 3-1 muestra un dibujo esquemático de un sistema de ensayo de tracción, mientras que la figura 3-2 muestra un compuesto epóxico Kevlar® durante un ensayo de tracción real.

Los datos de la fuerza y el alargamiento se pueden utilizar para calcular cantidades fundamentales como el ***esfuerzo ingenieril*** (σ)

| ***Esfuerzo ingenieril*** | Proporción de la carga aplicada a un área de la sección transversal.

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \tag{3.1}$$

Celda de carga
Abrazaderas superiores
Muestra
Abrazaderas inferiores
Barra móvil

Figura 3-1 Bastidor para ensayo de tracción

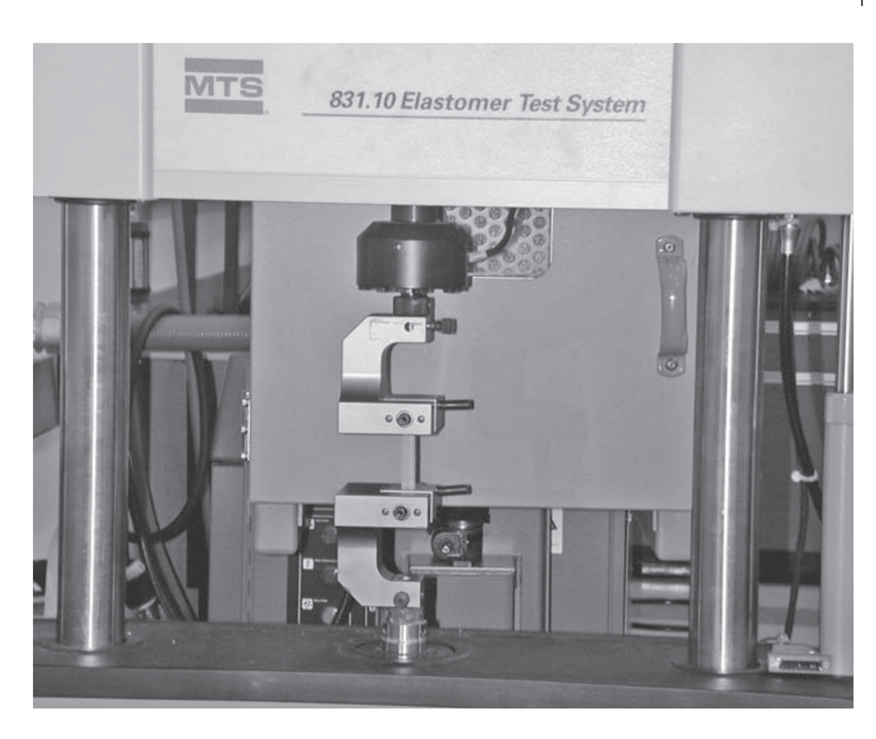


Figura 3-2 Fotografía de un ensayo de tracción sobre un compuesto epóxico Kevlar®

Cortesía de James Newell.

en donde *F* es la fuerza medida y A_0 es el área de la sección transversal inicial de la muestra, y la ***deformación ingenieril*** (ϵ),

$$\epsilon = \frac{1 - 1_0}{1_0}, \tag{3.2}$$

en donde l_0 es la longitud inicial de la muestra y l es la longitud de la muestra alargada. El ensayo se realiza hasta que la muestra se rompe. Los datos se reportan en forma de una gráfica de esfuerzo contra deformación como se muestra en la figura 3-3 y la tabla 3-3.

Esta gráfica relativamente simple proporciona una vista a varias propiedades clave. Durante los primeros pasos del ensayo de tracción, el material podría regresar a su estado original si la tensión se libera. La región en donde no suceden cambios permanentes al material se llama región de ***deformación elástica***. El material regresará completamente a su estado anterior una vez que la deformación se haya liberado, siempre que el material se mantenga en la región de deformación elástica, pero tan pronto como el primer cambio suceda por el cual el material no pueda recuperarse completamente, se inicia la ***deformación plástica***. Para la mayoría de los materiales, la curva de esfuerzo/deformación proporciona una línea recta en la región de deformación elástica, pero la pendiente cambia notablemente cuando inicia la deformación plástica. La tensión en el punto de transición entre las deformaciones elástica y plástica se llama ***resistencia a la conformación*** (σ_y). Una vez que la tensión sobre el material haya excedido la resistencia a la conformación, no regresará por completo a su forma original.

Aun cuando la deformación plástica haya iniciado, algunos materiales son capaces de manejar más tensión. La tensión aplicada a la fuerza más alta (lo máximo en la curva de esfuerzo/deformación) se llama ***resistencia a la tracción*** (σ_s) del material. La tensión en la cual el material finalmente se rompe por completo se llama ***resistencia a la ruptura*** (σ_B).

| ***Deformación ingenieril*** | Propiedad que se determina al medir el cambio en la longitud inicial de una muestra.

| ***Deformacón elástica*** | Región en una curva de esfuerzo/deformación en la cual no suceden cambios permanentes al material.

| ***Deformación plástica*** | Región en una curva de esfuerzo/deformación en la cual el material ha experimentado un cambio del cual no se recuperará por completo.

| ***Resistencia a la conformación*** | Tensión en el punto de transición entre las deformaciones elástica y plástica.

| ***Resistencia a la tracción*** | Tensión aplicada a la fuerza más alta en una curva de esfuerzo/deformación.

| ***Resistencia a la ruptura*** | Tensión en la cual el material se rompe completamente durante el ensayo de tracción.

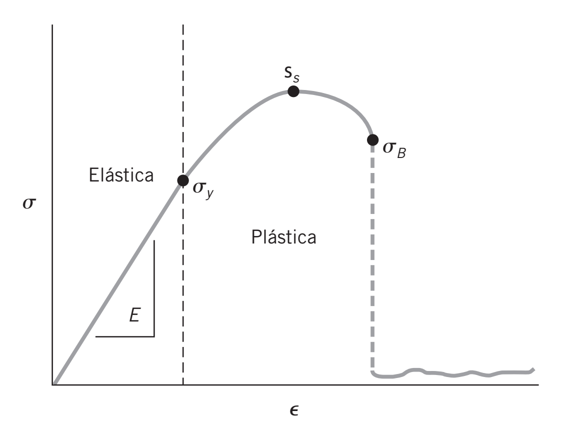


Figura 3-3 Curva representativa de esfuerzo/deformación

Tabla 3-3 Regiones de la curva de esfuerzo/deformación

Región de deformación elástica: el material regresa a su forma original cuando la tensión se libera, no hay daño permanente, la región es generalmente una línea recta.	
Región de deformación plástica: el material no puede recuperarse por completo cuando la tensión se libera debido a los cambios permanentes en la micro estructura.	
Región de ruptura: el material aquí falla después de pasar por la deformación plástica; los materiales frágiles fallan inmediatamente después de la deformación elástica.	

No todos los materiales pueden experimentar la deformación plástica sin romperse. Los materiales ***dúctiles*** se pueden deformar sin romperse, mientras que los materiales que fallan completamente al inicio de la deformación plástica son llamados ***frágiles***. La sección 3.9 acerca de la mecánica de fracturas proporciona comentarios más amplios sobre la distinción entre los materiales dúctiles y frágiles. Para los materiales frágiles, la resistencia a la conformación, la resistencia a la tracción y la resistencia a la ruptura son las mismas como se muestra en la figura 3-4.

| *Dúctiles* |
Materiales que se pueden deformar plásticamente sin romperse.

| *Frágiles* |
Materiales que fallan por completo al inicio de la deformación plástica. Estos materiales tienen gráficas lineales de esfuerzo contra deformación.

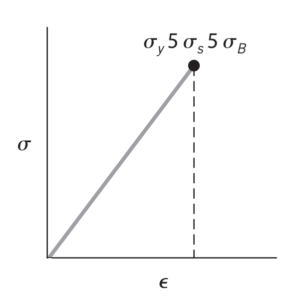


Figura 3-4 Curva de esfuerzo/deformación para un material frágil

La pendiente de la curva de esfuerzo/deformación en la región elástica proporciona una cantidad mostrada en la ecuación 3.3. Esta cantidad tiene tres nombres diferentes: ***módulo de elasticidad*** (E), ***módulo de tracción*** o ***módulo de Young***. Los materiales con energías de enlace altas también tienen altos módulos elásticos porque se requiere más fuerza para estirarlos. Mientras que el tamaño del grano tiene un impacto significativo en la resistencia a la tracción, el módulo de Young no es impactado por la microestructura del material y se mantiene igual a pesar del tamaño del grano. El grafito tiene el módulo teórico más alto (1080 GPa) de todos los materiales. La naturaleza aromática de los enlaces químicos del grafito mantiene el plano esencial perfectamente alineado.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \tag{3.3}$$

El área que se encuentra bajo la porción elástica de una curva de esfuerzo/deformación es la *energía elástica* (e_E) del material, la cual representa qué tanta energía puede absorber el material antes de deformarse permanentemente. La energía elástica siempre se puede determinar al integrar la curva

$$e_E = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon. \tag{3.4}$$

Para los materiales que despliegan un comportamiento elástico lineal, la relación se simplifica a

$$e_E = \frac{\sigma_y}{2}. \tag{3.5}$$

| *Módulo de elasticidad* |
La pendiente de la curva esfuerzo/deformación en la región elástica. También llamado módulo de Young o módulo de elasticidad.

| *Energía elástica* |
Área contenida bajo la porción elástica de una curva de esfuerzo/deformación, la cual representa cuánta energía puede absorber el material antes de deformarse en forma permanente..

La energía elástica se usa para calcular el ***módulo de resiliencia*** (E_r), la cual es la proporción de energía elástica de la deformación en el límite:

$$E_r = \frac{e_E}{\epsilon_y}. \tag{3.6}$$

El módulo de resiliencia determina cuánta energía se puede utilizar para la deformación y cuánta puede ser traducida a movimiento. Los fabricantes de pelotas de golf se esfuerzan para aumentar el módulo de resiliencia para mejorar el desempeño de su producto.

| *Módulo de resiliencia* |
Proporción de la energía elástica para la deformación en el límite, el cual determina cuánta energía se utilizará para la deformación y cuánta será traducida en movimiento.

Mientras que un material se deforma longitudinalmente (se estira), también pasa por una deformación lateral simultánea (encogimiento). El ***coeficiente de Poisson*** (μ), mostrado en la ecuación 3.7, relaciona la magnitud de estas deformaciones simultáneas.

$$\mu = \frac{-\epsilon_{\text{lateral}}}{\epsilon_{\text{longitudinal}}}. \tag{3.7}$$

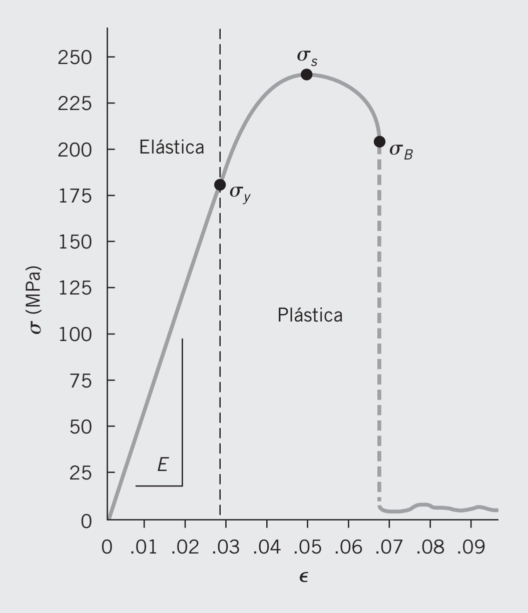
Para la mayoría de los materiales, el coeficiente de Poisson ronda alrededor de 0.3.

| *Coeficiente de Poisson* |
Relaciona la deformación longitudinal y la deformación lateral de un material bajo tensión.

Ejemplo 3-1

Para la curva de esfuerzo/deformación que se proporciona, determinar:

a) La resistencia a la conformación
b) La resistencia a la tracción
c) La resistencia a la ruptura
d) El módulo de Young
e) La deformación en la falla
f) Si el material es frágil o dúctil



SOLUCIÓN

a) El esfuerzo de deformación ocurre en el punto donde la curva de esfuerzo/deformación deja de ser lineal, aproximadamente a 180 MPa.
b) La resistencia a la tracción es el punto máximo en la curva de esfuerzo/deformación, aproximadamente a 240 MPa.
c) La tensión de ruptura es la tensión en falla total, aproximadamente a 205 MPa.
d) El módulo de Young es la pendiente de la curva de esfuerzo/deformación en la región elástica, aproximadamente a 4 500 MPa.
e) La deformación en la falla es aproximadamente a 0.068.
f) El material es dúctil puesto que la deformación plástica ocurre antes de la falla.

La cantidad de deformación que un material puede soportar sin romperse se llama *ductilidad*. Entre más dúctil es el material, es más fácil darle forma y maquinarlo, pero es menos probable que mantenga su forma bajo la tensión. Se utilizan dos medidas para evaluar la ductilidad, el porcentaje de elongación y el porcentaje de reducción en el área:

| ***Ductilidad*** |
La facilidad con la que un material se deforma sin romperse.

$$\% \text{ de elongación} = 100\% * \frac{(l_f - l_0)}{l_0} \quad (3.8)$$

y

$$\% \text{ de reducción en el área} = 100\% * \frac{A_f - A_0}{A_0} \quad (3.9)$$

en donde f representa los valores en la falla y el 0 representa los valores iniciales.

Ya se revisó que mientras un material se estira, su área transversal disminuye. Debido a que la deformación en el material es una función del área, la sección transversal reducida lleva a una mayor deformación. En el ejemplo mostrado en la figura 3-3, la tensión en el material va disminuyendo entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la ruptura, aunque la fuerza esté aumentando. De hecho, el área transversal real está disminuyendo mientras que la fórmula dada para calcular el esfuerzo en la ecuación 3.1 utiliza el área transversal inicial. El ***esfuerzo real*** (ϵ_t) y la ***deformación real*** (σ_t) en un material, consideradas para el cambio en el área transversal, está dado por

| ***Esfuerzo real*** |
Proporción de la fuerza aplicada a una muestra y el área transversal instantánea de una muestra.

$$\sigma_t = \frac{F}{A_i} \quad (3.10)$$

y

| ***Deformación real*** |
Representa la proporción de la longitud instantánea en la longitud inicial de la cadena.

$$\epsilon_t = \ln\frac{l_i}{l_0}. \quad (3.11)$$

Debido a la relativa complejidad para explicar el cambio en un área durante el ensayo de tracción, y debido al efecto limitado que el cambio usualmente tiene en los parámetros de interés, el esfuerzo y la deformación se utilizan generalmente en vez del esfuerzo y la deformación reales.

En algunos materiales dúctiles, incluyendo algunos polímeros y metales suaves como el plomo, el estrechamiento ocurre en un área altamente localizable llamada *estricción*. En este punto, el área transversal disminuye mucho más rápido que en el resto de la muestra. La mayoría de los niños han observado este fenómeno cuando estiran de su boca una goma de mascar. La goma de mascar se estrecha rápidamente en un punto y finalmente se rompe. La estricción generalmente es el resultado de los defectos que estuvieron presentes en la formación o inducidos bajo la carga de tracción.

| ***Estricción*** |
Disminución repentina en el área transversal de la región de una muestra bajo una carga de tracción.

Para algunos materiales, la transición entre las deformaciones elástica y plástica no se puede definir claramente a partir de una curva de esfuerzo/deformación. En dichos casos, en su lugar se calcula una ***resistencia a la conformación compensatoria*** (σ_y). La resistencia a la conformación compensatoria se determina al calcular la pendiente inicial de la curva de esfuerzo/deformación, posteriormente se dibuja una línea igual a la pendiente que inicia en el valor de deformación de 0.002. El nivel de esfuerzo en que esta nueva línea interseca la curva de esfuerzo/deformación es la resistencia a la conformación compensatoria. La figura 3-5 ilustra este proceso.

| ***Resistencia a la conformación compensatoria*** |
Es el estimado de una transición entre las deformaciones elástica y plástica de un material sin una región lineal en una curva de esfuerzo/deformación.

Para los datos que se muestran en la figura 3-5, la resistencia a la conformación compensatoria sería aproximadamente de 200 MPa, el punto en el cual la línea compensatoria cruza la curva de esfuerzo/deformación.

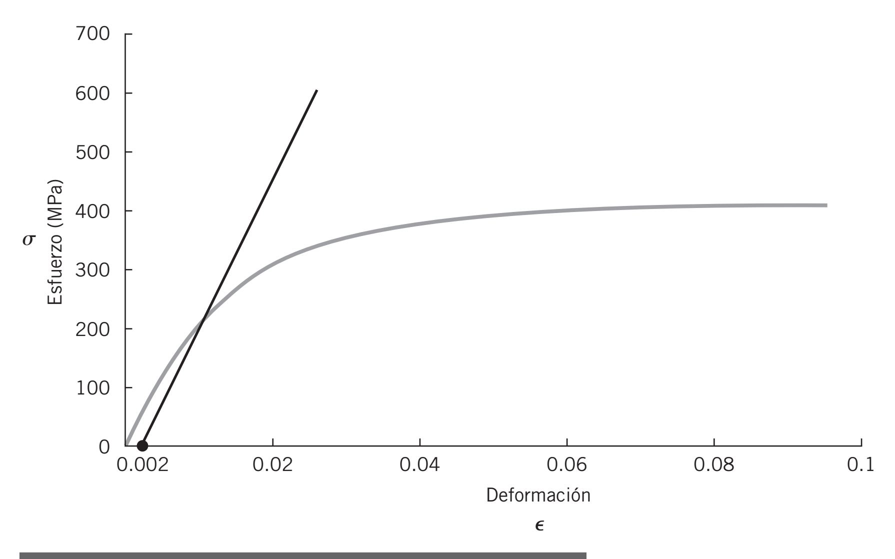
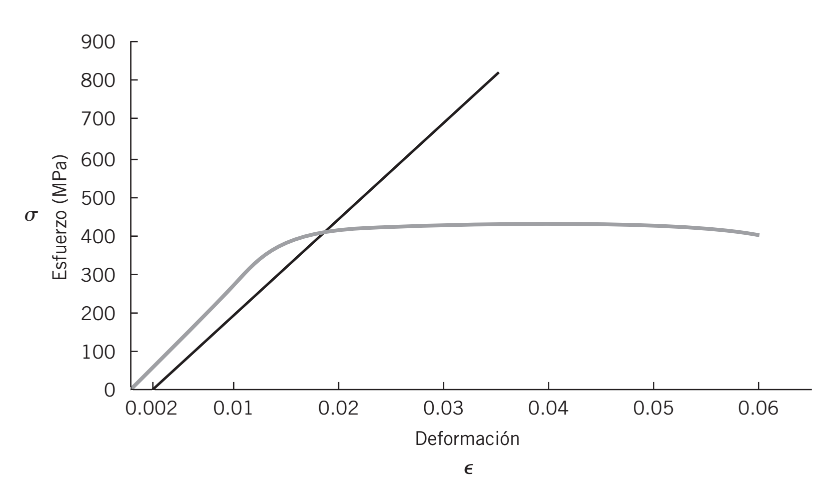




Figura 3-5 Resistencia a la conformación compensatoria

Ejemplo 3-2

Calcular la resistencia a la conformación compensatoria para el siguiente material:



SOLUCIÓN

La línea gris comienza con un valor de 0.002 con la misma pendiente que la pendiente inicial de la curva de esfuerzo/deformación. La línea gris interseca la curva de esfuerzo/deformación aproximadamente en 405 MPa, por lo que la resistencia a la conformación compensatoria es de aproximadamente de 405 MPa.

3.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN

De varias maneras, el ensayo de compresión es un análogo directo para el ensayo de tracción. Generalmente se utiliza el mismo aparato, pero en vez de separar la muestra, ésta se sujeta a una carga aplastante. Las ecuaciones 3.10 y 3.11 aplican para la determinación de la resistencia a la compresión y el módulo de compresión, a pesar de que el módulo de compresión es negativo puesto que l_i es menor que l_0. Varios materiales muestran módulos y resistencias de tracción y de compresión similares, por lo que los ensayos de compresión generalmente no se realizan excepto en casos donde se espera que el material soporte grandes fuerzas de compresión. Sin embargo, la resistencia a la compresión de varios polímeros y compuestos son significativamente diferentes de sus resistencias a la tracción.

El ensayo de compresión también permite un examen directo del modo de deformación como se muestra en la tabla 3-4. La deformación se clasifica como curveada cuando $L/D > 5$, de corte cuando $2.5 < L/D < 5$, de compresión homogénea cuando $L/D < 2$, de barril cuando existe fricción al contacto con la superficie y $L/D < 2$, y de doble barril cuando hay fricción y $L/D > 2$. También se pueden observar las inestabilidades de compresión.

Tabla 3-4 Resumen de los modos de deformación

Modo de deformación	*Forma resultante*	*Condición*
Curveada		$L/D > 5$
De corte		$2.5 < L/D < 5$
De doble barril		Hay fricción al contacto con la superficie $L/D > 2$
De barril		Hay fricción al contacto con la superficie $L/D < 2$
Compresión homogénea		$L/D < 2$
Inestabilidad de compresión		

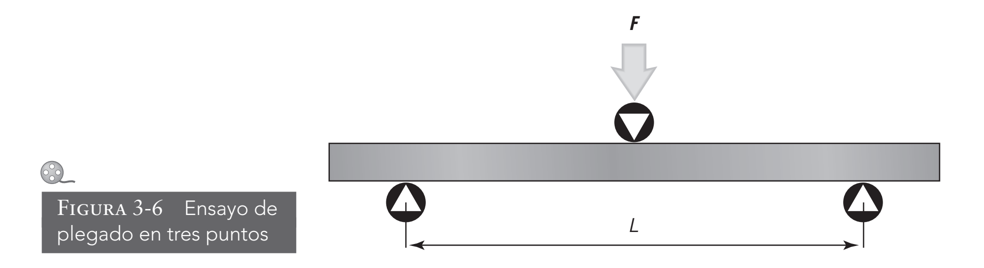


Figura 3-6 Ensayo de plegado en tres puntos

3.4 ENSAYO DE PLEGADO

Los materiales muy frágiles no soportan el ensayo de tracción y se fracturan al asegurarse a las abrazaderas. Muchas cerámicas frágiles también fallan a niveles muy bajos de deformación, provocando algo muy significativo en la más ligera desalineación en las abrazaderas. En tales casos,se usa un ensayo de plegado para revisar el comportamiento de deformación del material. La mayoría de los ensayos de flexión involucran cargas de tres puntos como se muestra en la figura 3-6, aunque en algunos casos se utilizan sistemas de ensayo en cuatro puntos. En el sistema de tres puntos,se aplica una fuerza (F) a la parte superior de la superficie de la muestra, colocando la parte superior en compresión. Un par de rodillos circulares, separados por una distancia (L), soportan la parte inferior de la muestra. Cuando la muestra comienza a desviarse, la parte inferior experimenta una resistencia a la tracción, cuyo máximo se concentra justo arriba de los rodillos. Para la mayoría de los cerámicos, la resistencia a la compresión está alrededor de un orden de magnitud mayor que la resistencia a la conformación, por lo que la falla comienza desde la parte inferior de la superficie. La ***resistencia a la flexión*** (σ_F) de la muestra se define como

| ***Resistencia a la flexión*** | Cantidad de esfuerzo de flexión que un material puede soportar antes de romperse. La cual se mide a través del ensayo de plegado.

$$\sigma_F = \frac{3F_f L}{2wh^2}, \tag{3.12}$$

donde (F_f) es la carga de la falla, L es la distancia entre los rodillos, w es el ancho de la muestra y h es el grosor de la muestra. El módulo de flexión (E_F) en la región elástica se define como

$$E_F = \frac{F_f L^3}{4wh^3\delta}, \tag{3.13}$$

donde δ es la cantidad de desviación experimentada por el material durante el doblado.

3.5 ENSAYO DE DUREZA

| ***Dureza*** | Resistencia de la superficie de un material a la penetración de un objeto duro bajo una fuerza estática.

La ***dureza*** es la resistencia de la superficie de un material a la penetración por un objeto duro y se relaciona con la resistencia al desgaste de los materiales. Los materiales duros corroen a los materiales más débiles y duran más. A pesar de que existen docenas de técnicas para medir la dureza, la más común es el ensayo Brinell, en donde una esfera de carburo de tungsteno de 10 mm de diámetro es presionada hacia la superficie del material de ensayo

utilizando una fuerza controlada. La ***dureza Brinell*** *(HB)* se determina por la fórmula

$$HB = \frac{F}{\left(\frac{\pi}{2}\right) D(D - \sqrt{D^2 - D_i^2})} \tag{3.14}$$

en donde F es la carga aplicada en kilogramos, D es el diámetro de la esfera (10 mm) y D_i es el diámetro de la impresión que dejó la esfera en el material de ensayo en milímetros. Los materiales más duros tienen valores HB más altos. La dureza Brinell para los metales se encuentra en un rango alrededor de 50 a 750. El valor se reporta como el número de dureza seguido de tres letras (HBW), de tal forma que la dureza Brinell de 300 se reportaría como 300 HBW. La W indica que se utilizaron esferas de carburo de tungsteno. Originalmente se utilizaban bolas de acero, pero ya no se consideran aceptables debido a que se alisan cuando la dureza Brinell de la muestra se acerca a 400. En la figura 3-7 se muestra un esquema del equipo para el ensayo Brinell.

El ensayo Brinell es rápido, fácil, confiablemente exacto y por mucho el más utilizado. También no es destructivo ya que el material no se rompe durante el ensayo. El hoyuelo resultante se parece a la marca que se queda en la puerta de un automóvil cuando un carrito de supermercado la golpea. El ***ensayo de dureza Rockwell*** es una variante del ensayo Brinell en donde el cono de diamante o la bola acero se utilizan en vez de una esfera de carburo de tungsteno. La medición se centra en cómo la profundidad de la impresión cambia con las diferentes fuerzas, pero el principio de operación se mantiene igual.

Los científicos en materiales por lo general convierten los valores Brinell a un punto en la escala de ***dureza Moh***, la cual fue desarrollada por Friederich Moh en 1822. Al material más suave, el talco, se le asignó un valor de 1, mientras que el diamante recibe un valor de 10. A otros ocho minerales más comunes se les asignaron los valores entre 2 y 9 de acuerdo al incremento en su dureza. La tabla 3-5 resume la escala de dureza Moh.

La escala Moh proporciona una sensación de calidad a los valores de dureza pero no es lineal. Como resultado, el topacio no es dos veces más duro que la fluorita. La figura 3-8 proporciona una comparación de los valores de las durezas Brinell, Rockwell y Moh junto a la comparación con metales comunes. En general, las cerámicas son usualmente más duras que los metales, los cuales son con frecuencia más duros que los polímeros.

| ***Dureza Brinell (HB)*** |
Una de las muchas escalas utilizadas para evaluar la resistencia de la superficie de un material a la penetración de un objeto duro bajo una fuerza estática.

| ***Ensayo de dureza Rockwell*** |
Método específico para medir la resistencia de la superficie de un material a la penetración de un objeto duro bajo una fuerza estática.

| ***Dureza Moh*** |
Escala cualitativa no lineal que se utiliza para evaluar la resistencia de la superficie de un material a la penetración de un objeto duro.

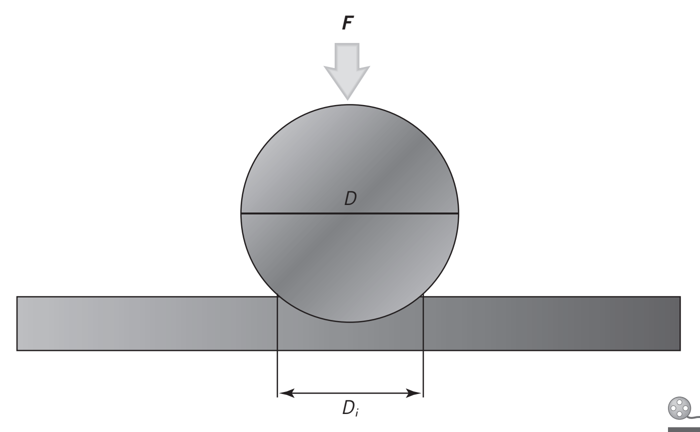


Figura 3-7 Dibujo esquemático de un ensayo Brinell.

Tabla 3-5 Escala de dureza Moh

Valor de la dureza Moh	*Mineral*
1	Talco
2	Yeso
3	Calcita
4	Fluorita
5	Apatita
6	Feldespato
7	Cuarzo
8	Topacio
9	Corindón
10	Diamante

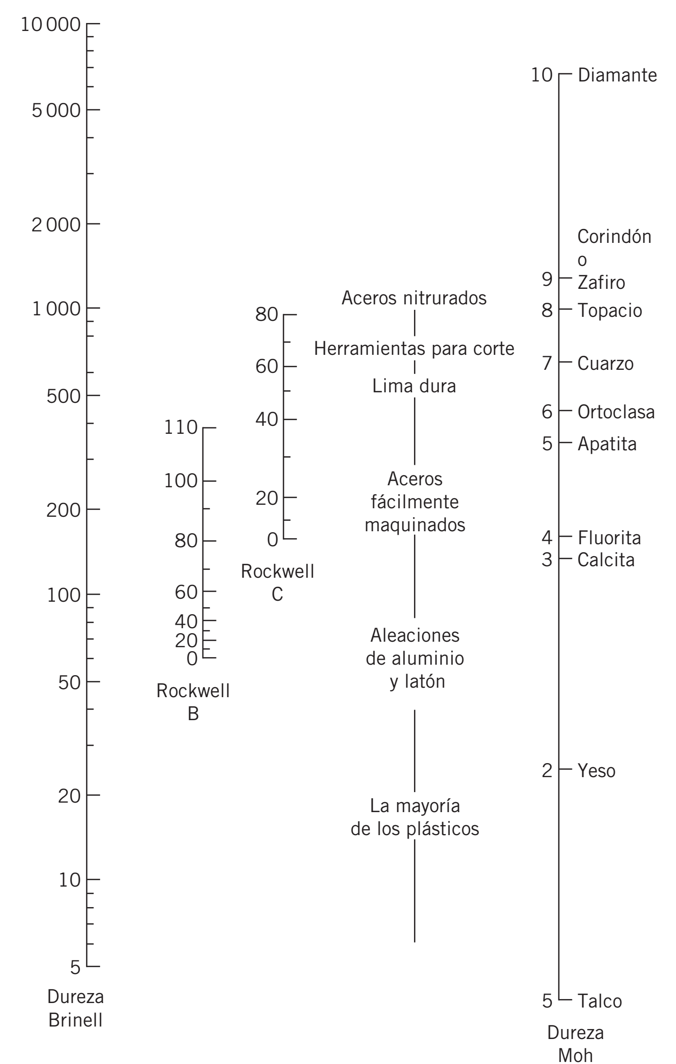


Figura 3-8 Comparación de las escalas de dureza

De William D. Callister, Materials Science and Engineering, 6a ed. Reimpresa con permiso de John Wiley & Sons, Inc.

Debido a que la dureza y la resistencia a la tracción se relacionan con la habilidad de un material para soportar la deformación plástica, existe una áspera correlación entre las dos propiedades. Se puede determinar un estimado parcial de la resistencia a la tracción con la dureza Brinell por las correlaciones

$$\sigma_s \text{ (lb/plg}^2) = 500 * \text{HB} \tag{3.15}$$

y

$$\sigma_s \text{ (MPa)} = 3.45 * \text{HB}. \tag{3.16}$$

Algunos materiales, incluyendo algunas muestras minerales y de vidrios, no pueden someterse a ensayos en la manera antes descrita porque las grandes fuerzas localizadas impuestas por la esfera penetrante destruyen las muestras. En estos casos, es necesaria una prueba de microdureza. Se aplican las cargas ligeras (por lo general unos cuantos gramos) al diamante abollador y la impresión correspondiente se convierte a un valor de dureza. La forma del abollador es de una pirámide (en el ensayo de escala Vickers) o de un rombo angosto (para el ensayo de la escala Knoop). Los detalles para el ensayo de microdureza se pueden encontrar en ASTM E-384.

3.6 ENSAYO DE FLUENCIA

La ***fluencia*** se refiere a la deformación plástica del material expuesto a una tensión continua con el paso del tiempo. La mayoría de los materiales experimentan fluencia solamente a temperaturas elevadas, cuando un esfuerzo continuo se aplica al material a una temperatura elevada, puede estirarse y al final fallar bajo la resistencia a la conformación. Finalmente, la fluencia sucede debido a las dislocaciones en el material. En temperaturas más altas, las dislocaciones se pueden difundir o propagar fácilmente, haciendo más probables las fallas.

| ***Fluencia*** | Deformación plástica de un material bajo tensión a temperaturas elevadas.

La medición de la fluencia es totalmente directa. En cada caso, el equipo consta de un marco, un horno para mantener la temperatura elevada alrededor de la muestra y el motor con un sistema de palanca para aplicar carga a la muestra. En sistemas más viejos, los usuarios tenían que agregar pesas para aplicar la carga. Un termocople se coloca en contacto directo con la muestra para medir la temperatura, mientras que los transductores de desplazamiento lineal (LDT) registran el alargamiento. La figura 3-9 muestra un esquema de un sistema de ensayo de fluencia.

a) Bastidor para fluencia

b) Horno de fluencia

FIGURA 3-9 Esquema de un sistema de ensayo de fluencia

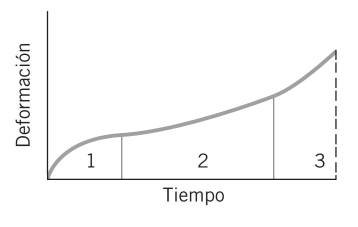



Figura 3-10 Gráfico representativo de deformación/tiempo en un ensayo de fluencia

| *Fluencia primaria* | Primera etapa de la fluencia durante la cual la dislocación de un material se desliza y se mueve alrededor de obstáculos.

| *Rango de fluencia* | Cambio en la pendiente de la gráfica deformación/tiempo en cualquier punto durante el ensayo de fluencia.

| *Fluencia secundaria* | Etapa en donde el rango en el que las dislocaciones se propagan es igual al rango en el cual las dislocaciones son bloqueadas, resultando una región totalmente lineal en la gráfica de deformación/tiempo.

| *Fluencia terciaria* | Etapa final de la fluencia durante la cual el rango de deformación se acelera rápidamente y continúa hasta la ruptura.

| *Parámetro de Larson-Miller (LM)* | Valor utilizado para caracterizar la fluencia basada en el tiempo, la temperatura y las constantes específicas de los materiales.

Los datos obtenidos de un ensayo de fluencia se trazan como esfuerzo (ϵ) contra tiempo. La gráfica, como el ejemplo mostrado en la figura 3-10, revela que la fluencia ocurre en tres diferentes etapas. Durante la ***fluencia primaria*** (etapa 1) las dislocaciones se deslizan y mueven alrededor de los obstáculos. En esta etapa, el rango de la fluencia (C) al inicio es rápida pero después disminuye. El ***rango de la fluencia*** se define como el cambio en cualquier punto de la pendiente de la curva de deformación/tiempo.

$$C = \frac{\Delta\epsilon}{\Delta t}. \tag{3.17}$$

Durante la ***fluencia secundaria*** (etapa 2), la velocidad con la que las dislocaciones se propagan igualan la velocidad con la que son bloqueadas, resultando en una región casi lineal en la gráfica. Mientras inicia la ***fluencia terciaria*** (etapa 3), la velocidad de deformación se acelera rápidamente y continúa hasta que se rompe. El ***parámetro de Larson-Miller (LM)*** se usa para caracterizar el comportamiento de la fluencia y puede calcularse mediante la ecuación

$$LM = \frac{T}{1000}(A + B \text{ In } t), \tag{3.18}$$

donde T es la temperatura en Kelvin, A y B son constantes empíricas de un material específico y t es el tiempo de ruptura en minutos.

3.7 ENSAYO DE IMPACTO

| *Tenacidad* | Propiedad que define la resistencia del material a los golpes, la cual se mide a través del ensayo de impacto.

| *Ensayo de impacto Charpy* | Ensayo de un solo golpe llamado así por Georges Charpy en el cual la muestra mellada es rota por un péndulo en movimiento.

| *Energía de impacto* | Cantidad de pérdida de energía mientras que la muestra de ensayo se destruye durante el ensayo de impacto.

| *Ensayo Izod* | Ensayo de impacto similar al ensayo Charpy en el cual la muestra es alineada verticalmente con la muesca fuera de la vista del martillo.

La ***tenacidad*** se refiere a la resistencia del material a un golpe y se mide a través de un ensayo de impacto. En un ***ensayo de impacto Charpy*** se asegura un martillo a un péndulo a cierta altura inicial (h_0). Una muestra mellada de ensayo, como la que se muestra en la figura 3-11, se asegura por donde pasará el martillo en la parte inferior del arco del péndulo. Al inicio del ensayo, se suelta el martillo y su energía potencial almacenada se transforma en energía cinética como se muestra en la figura 3-12. En la base del arco, el martillo golpea la muestra utilizando parte de la energía cinética en el proceso. Posteriormente, el martillo se eleva hacia el otro lado del arco hasta detenerse a una cierta altura final (h_f). Haciendo a un lado la fricción, si el martillo no encuentra resistencia en su camino, las alturas inicial y final serán las mismas.

La ***energía de impacto*** (e_I) de la muestra es la misma que la pérdida en la energía potencial entre los estados inicial y final:

$$e_I = mg(h_0 - h_f), \tag{3.19}$$

donde e_I es la energía de impacto, m es la masa del martillo y g es la aceleración derivada de la gravedad. Otra versión del ensayo de impacto, el ***ensayo Izod***, opera fundamentalmente de la misma forma, pero la alineación de la muestra mellada está alterada. En el ensayo Charpy el espécimen se alinea de forma

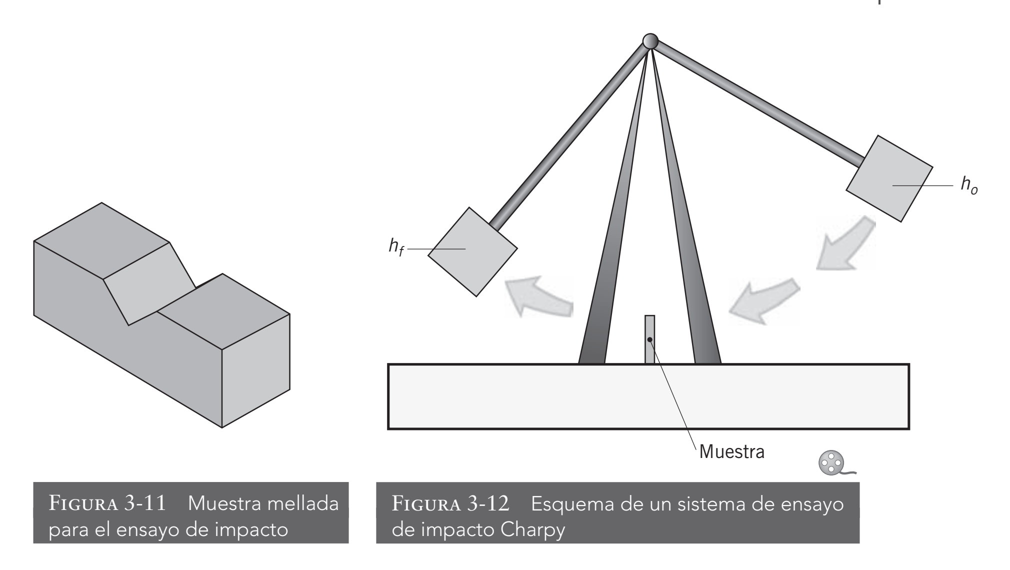


Figura 3-11 Muestra mellada para el ensayo de impacto

Figura 3-12 Esquema de un sistema de ensayo de impacto Charpy

horizontal para que el martillo golpee directamente la mella durante su paso, mientras que la muestra en el ensayo Izod se alinea verticalmente con la mella fuera del alcance del golpe, como se muestra en la figura 3-13. Algunas veces las muestras melladas y no alteradas se prueban y comparan para determinar la sensibilidad de la melladura del material. Los ensayos de impacto se realizan con frecuencia a diferentes temperaturas y son fácilmente aplicables a metales, cerámicos y a veces a polímeros, pero no funcionan bien para los compuestos. Entre más compleja sea la naturaleza de falla de los compuestos limita el valor de un ensayo sencillo.

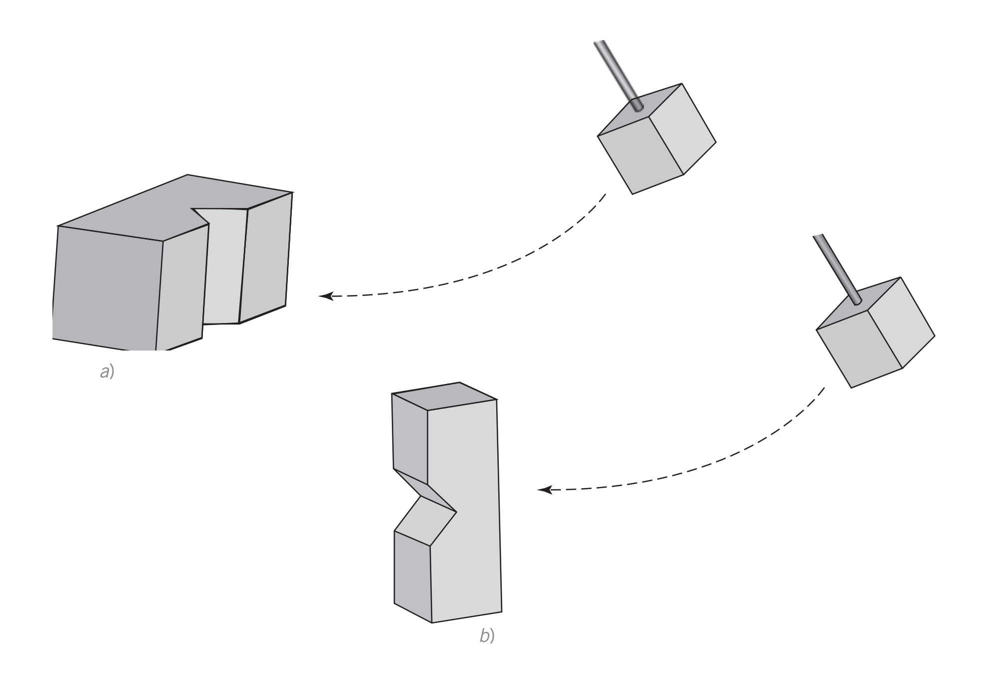


Figura 3-13 Alineación de muestras en ensayos de impacto *a*) Izod y *b*) Charpy

¿Se obtendrá el mismo resultado cada vez que se realice un ensayo específico?

La respuesta breve es no. Cada vez que se ensaya una muestra diferente, pero supuestamente idéntica a través de las diferentes técnicas descritas, se obtendrá un resultado que es al menos un poco diferente del primer ensayo. Las estadísticas proporcionan una herramienta efectiva para manejar este rango de error en la medición y para determinar si se están viendo verdaderas diferencias entre muestras o solo dispersión en los datos.

3.8 ERROR Y REPRODUCIBILIDAD EN LA MEDICIÓN

Si a siete personas se les da una varilla de acero y se les pide que midan su resistencia a la tracción, generarán siete resultados diferentes. Las diferencias microscópicas en las redes cristalinas, las desalineaciones cristalinas y cantidad de factores aseguran que dos muestras de material no son verdaderamente idénticas. Aun cuando fueran idénticas, todas los ensayos están sujetos a errores al azar inherentes que no se pueden eliminar. La solución más acertada para resolver este problema involucra efectuar múltiples medidas y reportar la media,

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \sigma i}{N}, \tag{3.20}$$

en donde $\bar{\sigma}$ es la media de la resistencia a la tracción, N es el número total de muestras ensayadas y σ_i es la resistencia a la tracción de una muestra dada.

Aunque, el calcular una media proporciona un primer paso muy útil, no proporciona suficiente información como para tomar muchas decisiones. Por ejemplo, si la media de la resistencia a la tracción de una varilla de acero fuera de 812 MPa basado en dos especímenes de ensayo, no se puede decir si la media vino de dos resultados similares (808 y 816 MPa) o de dos resultados muy diferentes (626 y 998 MPa). Se necesita alguna información adicional acerca de la difusión en los datos. Lo más importante es que cada vez que una muestra es ensayada, el valor de la media cambiará. En algunos casos puede cambiar drásticamente. La única forma de determinar el valor real medio es ensayar cada muestra, lo cual no es práctico. Si la única forma de determinar la seguridad contra choques de un automóvil fuera la de chocar cada unidad fabricada, nadie haría el ensayo.



| *Varianza* |
Cantidad estadística que toma en cuenta un error al azar de una variedad de fuentes y proporciona información acerca de la difusión de los datos.

En lugar de eso, una cantidad estadística llamada ***varianza*** (s^2) toma en cuenta un error al azar de una variedad de fuentes y proporciona información acerca de la difusión de los datos. La varianza se define como

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (\sigma_i - \bar{\sigma})^2. \tag{3.21}$$

| *Desviación estándar* |
Es la raíz cuadrada de la variación. Este valor proporciona más conocimiento respecto a la distancia donde es probable que esté la media en una muestra al azar.

La raíz cuadrada de la varianza se llama ***desviación estándar*** (s), la cual proporciona un conocimiento más directo acerca de qué tan lejos de la media es probable que esté una muestra al azar. Para las dos curvas (A y B) que se muestran en la figura 3-14, ambas tienen una media de $\bar{x}$, pero la curva B tiene una desviación estándar más grande que la curva A.

Figura 3-14 Dos curvas con la misma media pero con diferentes desviaciones estándar

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(\sigma_i - \overline{\sigma})^2}{N - 1}} \tag{3.22}$$

Las desviaciones estándar se basan en las probabilidades y se pueden usar para hacer declaraciones de probabilidad acerca de las medias reportadas. Para cualquier medición,

$$\overline{\mu} = \overline{x} \pm \delta, \tag{3.23}$$

en donde $\overline{\mu}$ es la media real que será determinada si las muestras infinitas se midieran, $\overline{x}$ es la media estimada determinada al ensayar n muestras y δ es la cantidad estadística llamada ***barra de error*** o ***límite de confianza***. El tamaño de las barras de error depende de un número de muestras, de la desviación estándar y el nivel de confianza deseado. Para la mayoría de las aplicaciones, 95% de la confianza se usa como un estándar. Al 95% de confianza, la media real ($\overline{\mu}$) será entre ($\overline{x}$ – δ) y ($\overline{x} \pm \delta$) de 95% del tiempo. Si se utilizara 99% de confianza, la media real sería encasillada por las barras de error a 99% del tiempo, pero las barras de error serían mucho más grandes. Las barras de error (δ) se determinan mediante la ecuación

| *Barra de error* |
Límite colocado en la eficacia de una media reportada, basado en el número de muestras ensayadas, la desviación estándar y el nivel deseado de confianza.

| *Límite de confianza* |
Grado de certeza en la estimación de una media.

$$\delta = \frac{t * s}{\sqrt{N}}, \tag{3.24}$$

en donde t es el valor de la ***tabla t*** estadística que se muestra en la tabla 3-6, s es la desviación estándar y N es el número de muestras.

| *Tabla t* |
Tabla estadística basada en los grados de libertad y el nivel de incertidumbre en un conjunto de valores de muestra reportados..

Los ejes en la tabla t que se muestran en la tabla 3-6 son confusos. La tabla consiste en los valores de t como una función de grados de libertad (n) y F, la cual es una función compleja relacionada al nivel de incertidumbre (α) de la ecuación

$$F = 1 - \frac{\alpha}{2}, \tag{3.25}$$

Para 95% de la confianza, el nivel de incertidumbre es de 5% (0.05), por lo que la ecuación 3.25 indica que F sería 0.975. Los grados de libertad (n) se definen como

$$n = N - 1, \tag{3.26}$$

por lo que existe menos de un grado de libertad que el número de muestras revisadas.

Al ensayar muestras adicionales se reducirá el tamaño de las barras de error sin bajar los límites de confianza porque la raíz cuadrada de N aparece en el denominador δ de la ecuación. Al incrementarse N también se reduce el valor de t, el cual aparece en el numerador. Finalmente, la decisión de cuántas muestras se deben probar balancea los costos de llevar a cabo ensayos adicionales con la exactitud de los resultados.



Tabla 3-6 Puntos de porcentaje, distribución t de Student

La tabla proporciona valores como:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{t} \frac{\Gamma(n + 1/2)}{\sqrt{n\pi}\,\Gamma(n/2)} \left(1 + \frac{x^2}{n}\right)^{-(n+1)/2} dx$$

en donde n es igual al número de grados de libertad.

n	*F(t)*							
	0.6	*0.75*	*0.9*	*0.95*	*0.975*	*0.99*	*0.995*	*0.9995*
1	0.325	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	0.289	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598
3	0.277	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.924
4	0.271	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	0.267	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.869
6	0.265	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	0.263	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.408
8	0.262	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	0.261	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	0.260	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	0.260	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	0.259	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	0.259	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	0.258	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	0.258	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	0.258	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015
17	0.257	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965
18	0.257	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922
19	0.257	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883
20	0.257	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850
21	0.257	0.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819
22	0.256	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792
23	0.256	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.767
24	0.256	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745
25	0.256	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725
26	0.256	0.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707
27	0.256	0.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690
28	0.256	0.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674
29	0.256	0.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659
30	0.256	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646
40	0.255	0.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551
60	0.254	0.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460
120	0.254	0.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.373
∞	0.253	0.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291

Ejemplo 3-3

Una serie de seis muestras compuestas son probadas en tensión. Las resistencias a la tracción (en MPa) para la seis muestras duplicadas fue de 742, 763, 699, 707, 714 y 751. Determinar la media de la resistencia a la tracción con las adecuadas barras de error basándose en la confianza de 95%.

SOLUCIÓN

La media de las muestras está dada por

$$\sigma_s = \frac{742 + 763 + 699 + 707 + 714 + 751}{6} = 729\text{MPa}.$$

Las barras de error se calculan con la ecuación 3.23:

$$\delta = \frac{t * s}{\sqrt{N}}$$

N es el número de muestras, en este caso 6; t se debe encontrar en la tabla 3-6, $t\ (F = .975, n = 5) = 2.571$.

La desviación estándar viene de la ecuación 3.21:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(\sigma_i - \overline{\sigma})^2}{N - 1}} = 26.1,$$

por lo que $\delta = (2.571 * 26.1)/\sqrt{6} = 27.4$. Por lo tanto, $\sigma_s = 729 \pm 27.4$ MPa. Es 95% probable que la media real se encuentre entre 721.6 y 756.4 MPa.

El mismo principio se puede utilizar para determinar si los dos conjuntos de muestras son estadísticamente diferentes. Cuando se examinan dos muestras distintas, se debe calcular la ***varianza combinada*** $(S_{12})^2$, pero como antes, la raíz cuadrada de la varianza combinada es más útil:

| ***Varianza combinada*** | Valor utilizado para determinar si dos conjuntos de muestras distintas son estadísticamente diferentes.

$$S_{12} = \sqrt{\frac{(N_1 - 1) * S_1^2 + (N_2 - 1) * S_2^2}{N_1 + N_2 - 2}}, \tag{3.27}$$

en donde N_1 es el número de muestras del primer material, S_1 es la desviación estándar del primer conjunto de muestras, N_2 es el número de muestras del segundo material, y S_2 es la desviación estándar del segundo conjunto de muestras.

La diferencia estándar entre las medias (S_D) se da por

$$S_D = S_{12}\sqrt{\frac{N_1 + N_2}{N_1 * N_2}}. \tag{3.28}$$

Las medias son estadística y significativamente diferentes sólo si se satisface la ecuación 3.29,

$$\left|\overline{X}_1 - \overline{X}_2\right| > t * S_{D,} \tag{3.29}$$

en donde $\overline{X}_1$ y $\overline{X}_2$ son las medias calculadas de los dos tipos de muestras.

Ejemplo 3-4

Suponer que 10 muestras de una aleación metálica estuvieron sujetas a un ensayo de dureza Brinell y se les proporcionó una media de dureza Brinell de 436 con una desviación estándar de 12.5. Ocho muestras de una aleación competidora resultaron en una media de dureza Brinell de 487 con una desviación estándar de 10.5. ¿Las muestras son significativamente diferentes?

SOLUCIÓN

A primera vista, la segunda aleación parece ser más dura que la primera, pero las estadísticas se deben revisar por seguridad. Primero, se debe calcular la raíz cuadrada de la varianza combinada

$$S_{12} = \sqrt{\frac{(N_1 - 1) * S_1^2 + (N_2 - 1) * S_2^2}{N_1 + N_2 - 2}}$$

$$= \sqrt{\frac{(10 - 1) * (12.5)^2 + (8 - 1) * (10.5)^2}{10 + 8 - 2}} = 11.7.$$

Después se utiliza ese valor para encontrar la diferencia estándar entre las medias

$$S_D = S_{12}\sqrt{\frac{N_1 + N_2}{N_1 * N_2}} = 11.7\sqrt{\frac{10 + 8}{10 * 8}} = 5.50.$$

Ahora se necesita el valor adecuado de t. Ya que se desea obtener 95% de confianza, el valor de F se mantiene a 0.975. Sin embargo, los grados de libertad se convierten

$$n = N_1 + N_2 - 2 = 10 + 8 - 2 = 16.$$

De la tabla 3-6, t ($F = .975$, $n = 16$) = 2.120.

Ahora ya se puede aplicar la ecuación 3.28.

$$\left|\overline{X}_1 - \overline{X}_2\right| > t * S_D \text{ se vuelve } |436 - 487| > 2.210 * 5.50 \text{ o } 51 > 11.7$$

Por lo tanto, la dureza Brinell de la segunda aleación es significativamente mayor que la de la primera a 95% de confianza.

El análisis estadístico anterior saca a relucir un increíble e importante dilema ético que enfrentan todas las compañías: ¿Cuántas pruebas son suficientes? Al ensayar muchas muestras se proporciona mayor exactitud en los resultados, pero cuestan dinero debido a las horas-hombre que se gastan al desarrollar los ensayos y destruir las muestras. Si una compañía ensaya choques de automóviles Rolls-Royce, cada recopilación de datos puede costar más de $100,000 dólares.

La mayoría de las compañías intentan encontrar el balance entre el costo y la certeza. Si una compañía hace un producto como las botellas para refrescos y 1 en 100 000 no puede soportar el proceso de presurización, la pérdida puede ser aceptable. Si un componente en 100 000 de un motor de avión está defectuoso, el resultado puede ser catastrófico.

¿Por qué los materiales fallan bajo tensión?

3.9 FRACTURAS MECÁNICAS

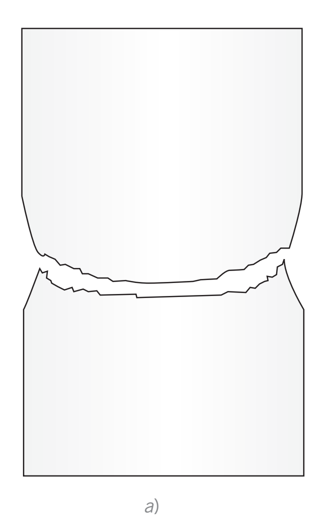
Todas las fallas del material resultan de la formación y propagación de una grieta, pero diferentes tipos de materiales responden a la formación de grietas de forma muy diferente. Los materiales dúctiles experimentan una deformación plástica sustancial en el área de la grieta. El material se adapta esencialmente a la presencia de la grieta. El crecimiento de la grieta es lento y, en algunos casos, la grieta se estabiliza y no crecerá a menos que se aplique una tensión incrementada. Las grietas en las aceras o en las paredes de las casas son estables.

Los materiales dúctiles fallan ya sea en el modo de *copa y cono* como las que se muestran en la figura 3-15, en donde una pieza tiene un centro plano con un borde extendido como una copa mientras que la otra tiene una punta casi cónica, o en una fractura cortada causada por una fuerza cortante lateral.

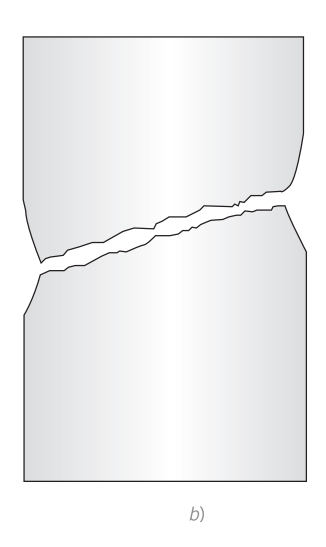
Los materiales frágiles se comportan de otra forma. No pueden pasar por la deformación plástica necesaria para estabilizar la grieta sin fallar. Como resultado, las pequeñas grietas se propagan espontáneamente, muy parecido a una pequeña grieta en el parabrisas de un automóvil que puede crecer y resultar en la falla total del parabrisas. Los materiales frágiles forman una superficie fracturada de exfoliación más simple como se muestra en la figura 3-16. El estudio del crecimiento de una grieta que lleva a una falla del material se llama ***fracturas mecánicas.***

| ***Fracturas mecánicas*** |
Estudio del crecimiento de una grieta que lleva a una falla del material.

La clave de todas las fracturas mecánicas es la presencia de una grieta u otro defecto de escala atómica como un poro. El desarrollo de la ecuación de esfuerzo $\sigma = F/A_0$ se predice asumiendo que el esfuerzo se distribuye equitativamente a través del área transversal de la muestra, pero la presencia de las grietas hace esta que esta suposición sea inválida.



a)



b)

Figura 3-15 Modos de fallas dúctiles: *a)* de copa y cono, *b)* corte lateral

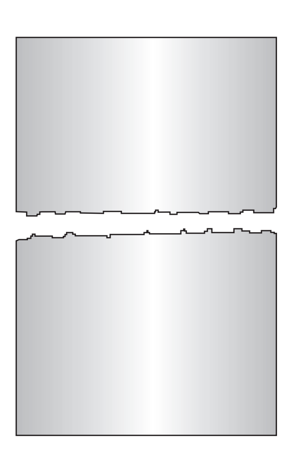


Figura 3-16 Fractura frágil

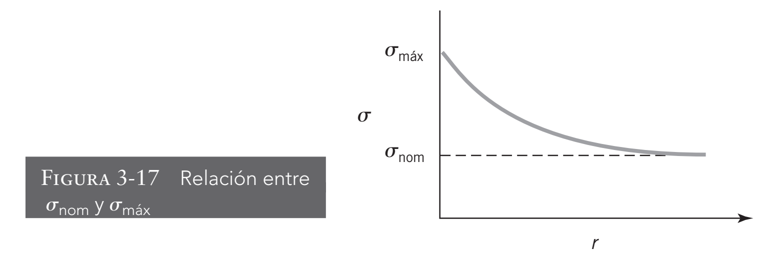


Figura 3-17 Relación entre σ_{nom} y $\sigma_{máx}$

| *Elevadores del esfuerzo* | Grietas, cavidades y otras imperfecciones en un material que causan altos incrementos localizados en el esfuerzo.

| *Esfuerzo nominal* | Valores del esfuerzo que no involucran la presencia de elevadores de esfuerzo dentro del material.

| *Factor de concentración del esfuerzo* | Proporción del máximo esfuerzo al esfuerzo aplicado.

Las grietas, cavidades y otras imperfecciones sirven como ***elevadores del esfuerzo*** que causan incrementos altamente localizados en la deformación. Por lo tanto, el esfuerzo tradicional antes comentado se define más apropiadamente como ***esfuerzo nominal*** (σ_{nom}) y la máxima tensión que se concentra en la punta de la grieta se llama esfuerzo máximo ($\sigma_{máx}$).

Un ***factor de concentración del esfuerzo*** (k) se puede definir como la proporción del esfuerzo máximo del esfuerzo aplicado,

$$k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}. \tag{3.30}$$

Si se hace una gráfica del esfuerzo contra la distancia de la imperfección, como la que se muestra en la figura 3-17, el esfuerzo que se siente en la imperfección es el esfuerzo nominal multiplicado por el factor de concentración del esfuerzo.

La magnitud del factor de concentración del esfuerzo depende de la geometría de la imperfección. Al inicio de 1913, los argumentos geométricos básicos mostraban que para un defecto elíptico, el factor de concentración del esfuerzo relacionado a la proporción de la longitud (a) de la elipse al ancho (b) por la ecuación,

$$k = \left(1 + 2\,\frac{a}{b}\right). \tag{3.31}$$

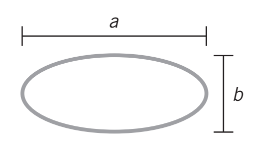


Figura 3-18 Defecto elíptico representativo

En la figura 3-18 se muestra una falla elíptica hipotética.

Un perfecto defecto circular tendría $a = b$ y el factor de concentración del esfuerzo sería 3, indicando que el defecto resultó en un triple incremento en el esfuerzo aplicado en el área local. Cuando el defecto se vuelve menos circular y más alargado, el factor de concentración del esfuerzo se incrementa significativamente. Para una grieta delgada en donde a $\gg b$, la ecuación 3.31 indica que la deformación en la punta de la grieta se acerca al infinito. Como tal, el factor de concentración del esfuerzo deja de tener significado y se debe emplear un nuevo parámetro, el *factor de* ***intensidad del esfuerzo*** (K). Para una grieta simple,

| *Factor de intensidad de esfuerzo* | Término que se toma en cuenta para el esfuerzo elevado aplicado a una grieta elíptica cuya longitud es mucho más grande que su ancho.

$$K = f\sigma\sqrt{\pi a}, \tag{3.32}$$

en donde f es un factor geométrico sin dimensión.

La cuestión crítica que determina si el material se fracturará como resultado de un esfuerzo aplicado es si la intensidad del esfuerzo en la punta de la grieta sobrepasará un umbral crítico.

Cuando K sobrepasa este factor de intensidad de esfuerzo crítico, llamado ***tenacidad a la fractura*** (K_c), la grieta se puede propagar. La tensión real que se necesita para la propagación de la grieta (σ_c) para un material frágil se define como

$$\sigma_c = 2\sigma_{nom}\sqrt{\frac{E\gamma_s}{\pi a}} \tag{3.33}$$

en donde E es el módulo de elasticidad del material, γ_s es la energía específica de la superficie en la superficie de la grieta, y a es la longitud de la grieta. La tenacidad a la fractura se relaciona a la tensión real necesaria para propagar la grieta mediante la ecuación 3.34:

$$K_c = f\sigma_c\sqrt{\pi a}. \tag{3.34}$$

| *Tenacidad a la fractura* | Valor que el factor de concentración del esfuerzo debe superar para permitir la propagación de la grieta.

Debido a que la tenacidad a la fractura es una función del ancho del material, no se puede tabular directamente. A determinado ancho, la influencia del ancho en la tenacidad a la fractura se vuelve menos pronunciada, y por encima de un grosor crítico, el ancho ya no impacta la tenacidad a la fractura. La tenacidad a la fractura del material por encima de este grosor crítico se llama ***tenacidad a la fractura de deformación plana*** (K_{Ic}), la cual es proporcionada por diferentes materiales de la tabla 3-7.

| *Tenacidad a la fractura de deformación plana* | Dureza de la fractura por arriba del grosor crítico en donde el ancho del material no impacta más a la tenacidad.

El parámetro más importante para determinar el esfuerzo necesario para la propagación de la grieta es el tamaño de la imperfección. Como resultado, en el proceso de fabricación se tiene mucho cuidado para reducir el tamaño de la imperfección. Las impurezas generalmente se filtran de los metales líquidos, los polímeros derretidos se pasan a través de filtros cernidores antes de darles forma, y se utiliza una técnica compleja de compresión de polvo (comentada en el capítulo 6) para reducir el tamaño de la imperfección y mejorar la dureza de muchos materiales cerámicos.

Tabla 3-7 Dureza de la tenacidad a la fractura de deformación plana para diferentes materiales

Material	K_{IC} ($MPa\sqrt{m}$)
Terpolímero ABS	4
Alúmina (Al_2O_3)	1.5
Aleaciones de aluminio y cobre	20-30
Hierro colado	6-20
Cemento/concreto	0.2
Magnesia (MgO)	3
Policarbonato	2.7
Polietileno (alta densidad)	2
Polietileno (baja densidad)	1
Polimetilmatacrilato (PMMA)	0.8
Porcelana	1
Carburo de silicio	3
Acero – carbono medio	51
Acero – cromo de níquel	42-73
Zirconia (endurecida)	9
Otros metales dúctiles	100-350

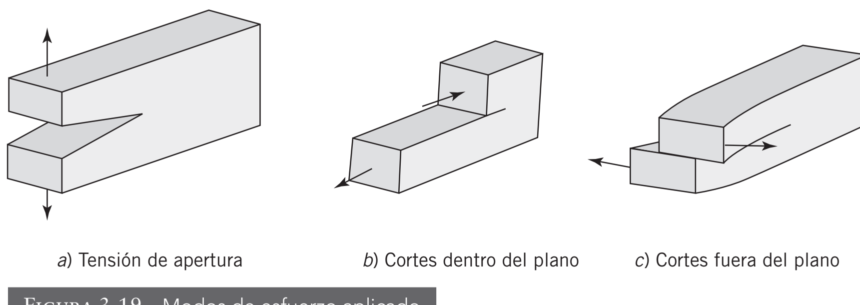


Figura 3-19 Modos de esfuerzo aplicado

| *Transición dúctil a frágil* |
Transición de algunos metales en donde un cambio en la temperatura provoca que éstos se transformen entre un comportamiento dúctil y frágil.

| *Tensiones de apertura* |
Tensiones que actúan perpendicularmente a la dirección de la grieta, provocando que las orillas de la grieta se separen y abran más la grieta.

| *Corte dentro del plano* |
Aplicación de las tensiones paralelas a la grieta provocando que la porción superior sea empujada hacia delante y la porción inferior sea jalada hacia la dirección contraria.

| *Corte fuera del plano* |
Aplicación de una tensión perpendicular a la grieta, la cual jala las porciones superiores e inferiores en direcciones contrarias.

A pesar de que el tamaño de la imperfección es el parámetro más importante, muchos otros factores impactan la concentración del esfuerzo, incluyendo la ductilidad, la temperatura y el tamaño del grano. El área alrededor de la punta de la grieta en los materiales dúctiles puede pasar por deformación plástica y liberar parte de la intensificación de la tensión. Como resultado, los polímeros y cerámicos frágiles tienen menos tenacidad que los metales dúctiles. La temperatura impacta la tenacidad de los materiales que tienen una transición entre el comportamiento dúctil y frágil. La mayoría de los polímeros pasan por una transición distinta entre frágiles, los materiales vítreos con poca tenacidad y más suaves y materiales con más caucho con tenacidad mucho más alta. Los metales con estructura cúbica de caras centradas (FCC) generalmente no pasan por una ***transición dúctil a frágil***, pero los metales cúbicos de cuerpo centrado (BCC) sí lo hacen. Los tamaños del grano pequeños también aumentan la tenacidad.

El comportamiento de la grieta ante la presencia de la tensión también depende de la dirección del esfuerzo relativo a la grieta. Las ***tensiones de apertura*** actúan perpendicularmente a la dirección de la grieta como se muestra en la figura 3-19a). Una tensión de apertura separa las puntas de la grieta y provoca que ésta se abra más. Una tensión de apertura aplicada en dirección opuesta puede juntar la grieta sin que resulte una propagación. Los ***cortes dentro del plano*** involucran la aplicación de la tensión paralela a la grieta. La porción superior de la grieta se empuja hacia delante mientras que la parte inferior se empuja hacia la dirección contraria. El esfuerzo de corte propaga la grieta al separar la parte superior de la inferior, pero ninguna de las dos mitades abandona su plano original como se muestra en la figura 3-19b). El ***corte fuera del plano*** resulta cuando una tensión perpendicular a la grieta jala las mitades superior e inferior de la grieta en direcciones opuestas como se muestra en la figura 3-19c).

¿Cómo cambian las propiedades mecánicas con el tiempo?

Las condiciones ambientales y el tipo de material influyen en cómo cambian las propiedades con el tiempo. El metal que se deja en agua salada por un año se comportará diferente a un material que se mantiene en un ambiente limpio y seco. Dos ensayos primarios proporcionan una visión de cómo las propiedades cambian con el tiempo: el ensayo de fatiga y los estudios de envejecimiento acelerado.

3.10 ENSAYO DE FATIGA

Los materiales a la larga fallarán al ser expuestos a tensiones repetidas, aun cuando el nivel de esfuerzo esté por debajo de la resistencia a la compresión. La falla debida a la tensión repetida por debajo de la resistencia a la compresión se llama ***fatiga***. A pesar de que todas las clases de materiales pueden experimentar fatiga, es especialmente importante en los metales. Las metas de los ensayos de fatiga son determinar el número de ciclos de esfuerzos a un nivel de tensión dado que un material puede experimentar antes de fallar (la ***vida de fatiga***) y el nivel de tensión bajo el cual hay 50% de probabilidad de que la falla nunca ocurrirá (el ***límite de resistencia***).

| *Fatiga* |
Es la falla debido a las tensiones repetidas bajo la resistencia a la conformación.

| *Vida de fatiga* |
Número de ciclos a un nivel de tensión dado que un material puede experimentar antes de fallar.

| *Límite de resistencia* |
Nivel de tensión bajo el cual hay 50% de probabilidad de que no se lleve a cabo la falla.

El ensayo más común de fatiga utiliza un ***ensayo de viga voladiza*** similar al que se muestra en la figura 3-20. Un espécimen en forma de cilindro se monta sobre un tornillo en una de sus puntas y una pesa o yugo se aplica en la otra punta. Un motor hace rotar la muestra produciendo fuerzas de tracción y de compresión alternadas mientras que la muestra da vueltas como se muestra en la figura 3-21. Un contador registra el número de ciclos hasta que el espécimen falla. Para cada muestra, la amplitud de la tensión (S) se mide mediante la ecuación

| *Ensayo de viga voladiza* |
Método utilizado para determinar la fatiga alternando los esfuerzos de tracción y compresión de una muestra.

$$S = \frac{10.18\, lm}{d^3}, \tag{3.35}$$

en donde l es la longitud del espécimen probado, m es la masa de la pesa o yugo aplicado y d es el diámetro del espécimen.

Se ensayan varias muestras a diferentes niveles de tensión y los resultados se conjuntan para formar una ***curva S-N***, en donde la amplitud de la tensión se traza contra el logaritmo natural del número de ciclos a la falla como se muestra en la figura 3-22. Esta curva se puede utilizar para determinar la vida de fatiga del material a un nivel de tensión dado. Estas curvas también se llaman *curvas Wohler,* a partir de que en el siglo XIX, el ingeniero August Wohler estudiara las causas de las fracturas en los ejes de las vías del tren. El nivel de tensión en el punto de inflexión en la curva S-N proporciona el límite de resistencia.

| *Curva S-N* |
Curva que traza los resultados de los ensayos de varias muestras a diferentes niveles de esfuerzo que se utiliza para determinar la vida de fatiga de un material a un nivel de esfuerzo dado.

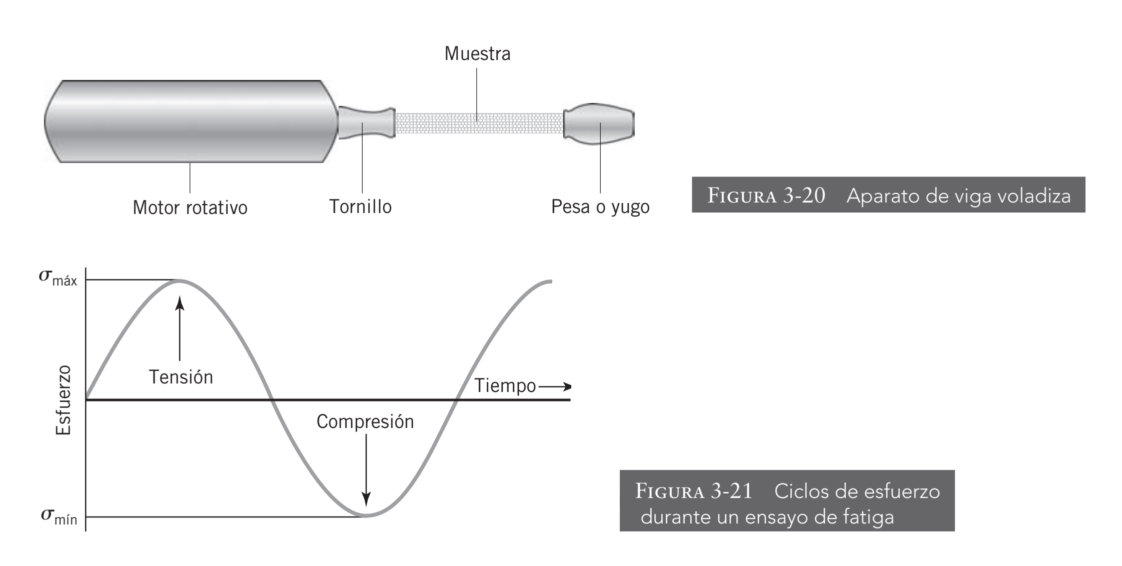


Figura 3-20 Aparato de viga voladiza

Figura 3-21 Ciclos de esfuerzo durante un ensayo de fatiga

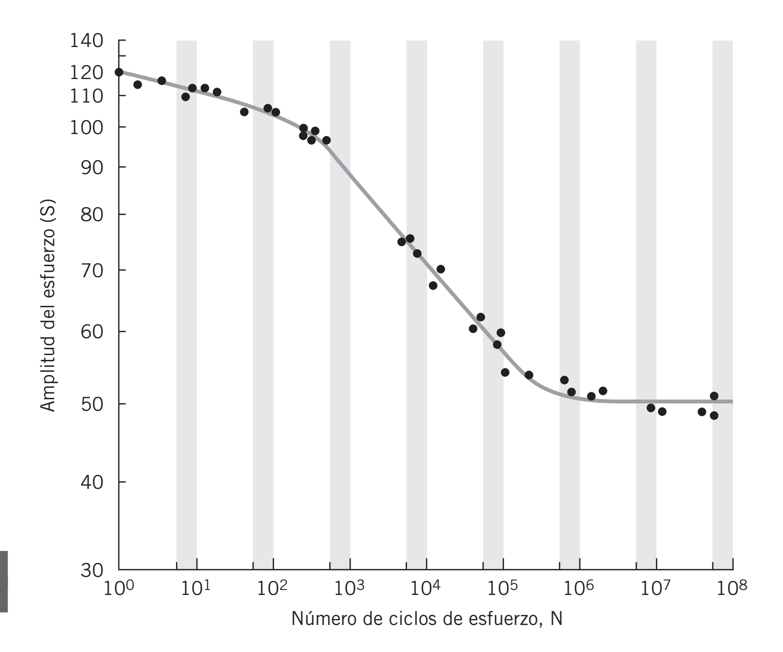


Figura 3-2 Curva S-N representativa de un ensayo de fatiga

Para algunos materiales, el límite de resistencia es de aproximadamente 50 % de la resistencia a la tracción. Algunos materiales, incluyendo el aluminio y la mayoría de los polímeros, no tienen límite a la resistencia. Si son expuestos a muchos ciclos a cualquier nivel de tensión, eventualmente fallarán. Es por esto que las compañías de aviones cautelosamente registran los números de ciclos de esfuerzo (experimentados durante el despegue y aterrizaje) que pasa cada avión y rutinariamente reemplazan las alas y otras partes que experimenten tensión antes de que se acerque su vida de fatiga. Esta lección se aprendió debido a una tragedia. En 1954, tres aviones de de Havilland Comet se partieron en medio del aire y se estrellaron. Investigaciones posteriores revelaron que las esquinas más puntiagudas alrededor de las ventanas proporcionaban el inicio para las grietas. Inmediatamente todas las ventanas de los aviones fueron rediseñadas y el ensayo de fatiga se volvió rutina en la industria.

Los problemas con la variación en la medición son muy importantes en los ensayos de fatiga. La dispersión inherente en los datos hace que el determinar la vida exacta de fatiga para un material sea difícil. Se generan grandes números en las curvas S-N para mejorar la forma estadística de los datos, pero los diseñadores deben tener mucho cuidado de no permitir que su material se acerque a la vida de fatiga.

3.11 ESTUDIOS DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO

Las propiedades de la mayoría de los materiales cambian con la exposición prolongada al calor, a la luz y al oxígeno. La forma más certera de determinar cómo las propiedades de un material específico cambiarán con las condiciones ambientales a través del tiempo es simulando las condiciones ambientales en el laboratorio y llevar a cabo los tipos de ensayos descritos en este capítulo en diferentes momentos a través de la vida útil del material. Desafortunadamente, el horizonte a largo tiempo de dichos ensayos los hace

imprácticos. Si una empresa de polímeros desarrolla una nueva fórmula para la pintura de los automóviles, podría pintar varias muestras de automóviles y colocarlas en diferentes partes del país durante 15 años para ver cómo se mantienen, pero la empresa no generaría ganancias de la pintura durante 15 años y otra empresa podría desarrollar algo mucho mejor en ese lapso de tiempo.

En vez de esto, las empresas desarrollan ***estudios de envejecimiento acelerado*** en las que el horizonte del tiempo se acorta al incrementar la intensidad de la exposición a otras variables. Los estudios de reacción cinética indican que los mismos procedimientos fundamentales ocurren a diferentes temperaturas, pero la temperatura impacta significativamente el rango de los procesos. La meta de un estudio de envejecimiento acelerado es utilizar un ***tiempo de propiedad equivalente*** (EPT, por sus siglas en inglés) para hacer que suceda el mismo proceso en un tiempo más corto. Por ejemplo, si se espera que un componente de metal en un motor dure seis meses en el aire (21% de oxígeno) a 200º C, se puede obtener una reacción equivalente al elevar la temperatura a 300º C en un tiempo más corto.

| ***Estudios de envejecimiento acelerado*** |
Ensayos que aproximan los impactos de una variable ambiental sobre un material con el paso del tiempo al exponer al material a un nivel más alto de esa variable para tiempos más cortos.

| ***Tiempo de propiedad equivalente (EPT)*** |
Periodo utilizado para forzar a que ocurra el mismo proceso de envejecimiento en una muestra dentro de un periodo más corto.

La ecuación de Arrhenius se puede utilizar para relacionar el tiempo y la temperatura. Como se comentó en el capítulo 2, la mayoría de los cambios del material siguen la forma:

$$\frac{dG}{dt} = A_0 \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right), \tag{3.36}$$

en donde G es la propiedad de interés, t es el tiempo, E_A es la energía de activación, R es la constante del gas ideal, A_0 es la constante pre exponencial y T es la temperatura. Cuando los datos no están disponibles para el uso de la ecuación de Arrhenius, generalmente se utiliza la aproximación de que el rango del cambio se duplica por cada 8º C a 10º C de incremento en la temperatura, pero su exactitud depende de la activación real de la energía del sistema.

Los estudios de envejecimiento acelerado proporcionan información útil e importante en un periodo más corto que los estudios de envejecimiento de vida, pero es importante reconocer que el EPT es un estimado idealizado. Los problemas pueden omitirse completamente o parecer más serios de lo que realmente son. Finalmente, los estudios de envejecimiento acelerado son más útiles como una herramienta para identificar las inquietudes para estudios más metódicos.

Resumen del capítulo 3



En este capítulo se examinaron:

- Los normas ASTM para desarrollar ensayos en materiales.
- La operación de un ensayo de tracción.
- La definición y el cálculo de la resistencia a la conformación, la resistencia a la tracción, la resistencia a la ruptura, el módulos de tracción de (Young), el coeficiente de Poisson, la resistencia a la conformación compensatoria, el esfuerzo, la deformación, el esfuerzo real, la deformación real y el módulo de resiliencia.
- La diferencia entre el estiramiento elástico y la deformación plástica.
- El ensayo de compresión y los modos de deformación.
- El ensayo de plegado y la medición de la resistencia a la flexión.
- La dureza y su medición e importancia.
- La relación entre las durezas Brinnel, Rockwell y Moh.
- La fluencia y los principios del ensayo de fluencia.
- Las diferencias entre las fluencias primaria, secundaria y terciaria.
- La definición de tenacidad y su medición a través de ensayos de impacto.
- El error y reproducibilidad en los ensayos.
- El cálculo y uso de 95% de los límites de confianza.
- El uso de varianzas combinadas para determinar si dos medias son estadísticamente diferentes.
- La diferencia entre una fractura frágil y una fractura dúctil.
- Cómo calcular los factores de intensificación de esfuerzo y cómo determinar si una grieta se puede extender o no.
- La importancia de la fatiga y los principios de los ensayos de fatiga.
- La determinación de la vida de fatiga y el límite de resistencia a partir de una curva S-N.
- Los usos y limitaciones de los estudios de envejecimiento acelerado.

Términos clave

barra de error *p. 87*
coeficiente de Poisson *p. 75*
corte dentro del plano *p. 94*
corte fuera del plano *p. 94*
curva S-N *p. 95*
deformación ingenieril *p. 72*
deformación plástica *p. 73*
deformación real *p. 77*
desviación estándar *p. 86*
dúctil *p. 75*
ductilidad *p. 77*
dureza *p. 80*
dureza Brinell (HB) *p. 81*
dureza Moh *p. 81*
elevadores de esfuerzo *p. 92*
energía de impacto *p. 84*
energía elástica *p. 75*
ensayo de dureza *p. 71*
ensayo de dureza Rockwell *p. 81*
ensayo de impacto Charpy *p. 84*
ensayo de plegado *p. 70*
ensayo de tracción *p. 70*
ensayo de viga voladiza *p. 95*
ensayo Izod *p. 84*

Problemas de tarea

1. El Departamento de Defensa de Estados Unidos ha contratado a una empresa para probar una nueva y avanzada cerámica para determinar su adecuación para el blindaje de un tanque. Además del costo, describa las tres propiedades físicas (nombres y definiciones) que crea se puedan utilizar para esta aplicación, explique por qué son muy importantes y describa a detalle (si es necesario con fórmulas, gráficas y esquemas sencillos) cómo mediría estas propiedades.

2. El ejército estadounidense está buscando reducir costos, por lo que decide realizar menos ensayos en las ruedas de tracción de los tanques. Un científico sugirió eliminar los ensayos de dureza mientras que otro sugirió eliminar los ensayos de tenacidad. Explique la diferencia entre la tenacidad y la dureza y comente por qué cada una puede ser importante para las ruedas de tracción de un tanque.

3. Un ensayo de plegado se utiliza para medir la resistencia y el módulo de flexión de una muestra. Si la longitud relevante de una muestra es de 10 pulgadas, la muestra es de 1 pulgada de altura y su resistencia y módulo de flexión es de 10 lb/plg^2 y 1 000 lb/plg^2, respectivamente, determinar la cantidad de desviación experimentada por la muestra durante el ensayo.

4. Dibujar dos gráficas representativas del ensayo de tracción, uno para un material frágil y otro para un material dúctil. En cada gráfica etiquetar los ejes, la resistencia a la tracción, la resistencia a la conformación, la resistencia a la ruptura, el módulo de elasticidad y las regiones en las cuales ocurre el estiramiento elástico y la deformación plástica.

5. Una inventora afirma que puede incrementar la resistencia a la tracción de una fibra polimérica al añadirle una pequeña cantidad de un elemento raro llamado toughenitupneum durante el spinning. Para probar su afirmación, ella proporciona datos obtenidos de muestras ya ensayadas con y sin la adición del elemento. Las seis muestras ensayadas sin la adición tenían resistencia a la tracción de 3100, 2577, 2715, 2925, 3250 y 2888 GPa, respectivamente. Las seis muestras ensayadas con la adición tenían resistencias a la conformación de 3725, 3090, 3334, 3616, 3102 y 3441 GPa. ¿La inventora probó su afirmación? De no ser así, sugiera las mejoras que pueden ayudarla.

6. Los siguientes datos de tracción fueron recolectados de un espécimen de ensayo estándar con un diámetro de 0.505 pulgadas de una aleación de cobre.

Carga (lb-fuerza)	Longitud de la muestra (pulgadas)
0	2.00000
3 000	2.00167
6 000	2.00383
7 500	2.00617
9 000	2.00900
10 500	2.04000
12 000	2.26000
12 400	2.50000
11 400	3.02000 (fractura)

Después de la fractura, la longitud de la muestra es de 3.014 pulgadas y el diámetro es de 0.374 pulgadas.

Grafique los datos y calcule:

a) La resistencia a la conformación compensatoria
b) La resistencia a la tracción
c) El módulo de elasticidad
d) El esfuerzo ingenieril en la fractura
e) El esfuerzo real en la fractura
f) El módulo de resiliencia

Posteriormente etiquete las regiones de la deformación plástica y el límite elástico en su trazo.

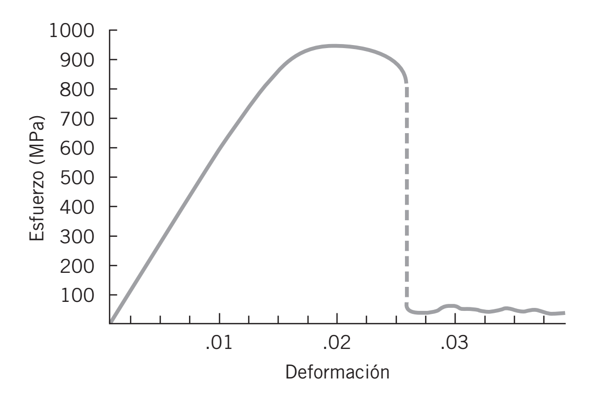
7. La interpretación de los datos del ensayo de tracción para la mayoría de los polímeros es más complicada que para otros materiales. A diferencia de otros materiales, no existe una deformación plástica real en la mayoría de los polímeros. Debido a que las cadenas pueden fluir entre sí, por lo general los tratamientos térmicos pueden regresar un polímero a su resistencia original, aun cuando previamente haya sido tensionado hasta casi su resistencia a la tracción.

a) ¿Qué parámetro clave no se puede medir en la mayoría de los polímeros por un ensayo de tracción?
b) Los polímeros de alto rendimiento (como Kevlar) no experimentan esta complicación y fallan como un material frágil. Dibuje una gráfica de un ensayo de tracción para Kevlar y etiquete la resistencia a la tracción, la resistencia a la conformación, el módulo de tracción, la resistencia a la ruptura, la región de deformación elástica y la región de la deformación plástica.

8. Sobre una muestra de metal se lleva a cabo un ensayo Brinell. Sobre una bola de carburo de tungsteno de 10 mm se aplica una carga de 3 000 kg por 30 segundos y deja una hendidura de 9.75 mm en la muestra. Calcule la dureza Brinell y determine dónde encaja en la escala de dureza Moh.

9. En un ensayo Brinell, ¿qué diámetro de impresión resultaría al aplicar una carga de 3 000 kg a una esfera de carburo de tungsteno de una muestra con 420 HBW?

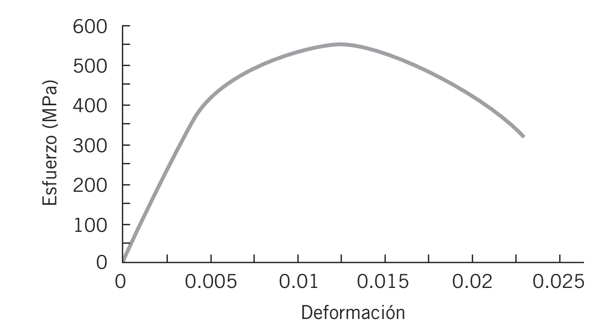
10. Para los siguientes datos,



determinar:

a) La resistencia a la conformación
b) La resistencia a la tracción
c) El módulo de Young
d) La resistencia a la ruptura
e) Si el material era frágil o dúctil
f) El módulo de resiliencia
g) El porcentaje de alargamiento

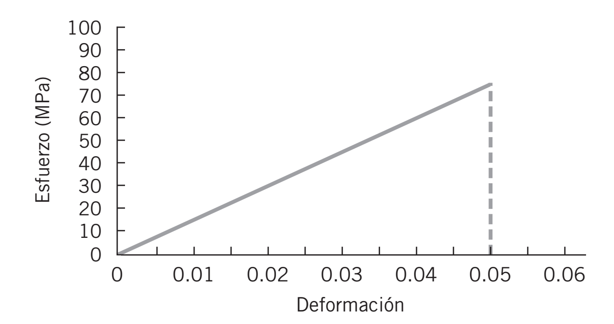
11. Para los siguientes datos,



determinar:

a) La resistencia a la conformación
b) La resistencia a la tracción
c) El módulo de Young
d) La resistencia a la ruptura
e) Si el material era frágil o dúctil
f) El módulo de resiliencia

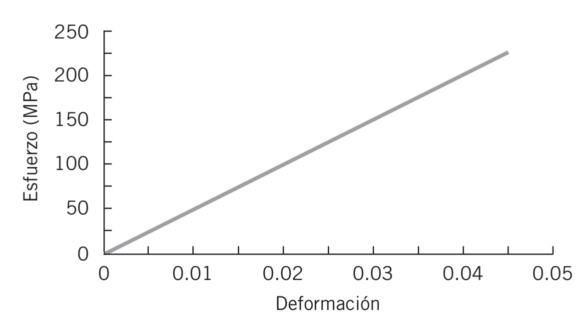
12. Para los siguientes datos,



determinar:

a) La resistencia a la conformación
b) La resistencia a la tracción
c) El módulo de Young
d) La resistencia a la ruptura
e) Si el material era frágil o dúctil
f) El módulo de resiliencia

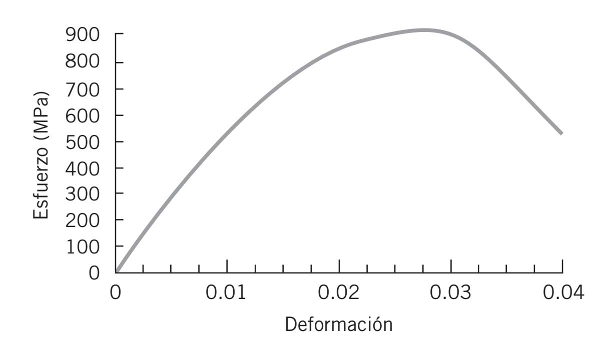
13. Para los siguientes datos,



determinar:

a) La resistencia a la conformación
b) La resistencia a la tracción
c) El módulo de Young
d) La resistencia a la ruptura
e) Si el material era frágil o dúctil
f) El módulo de resiliencia

14. Para los siguientes datos,



determinar:

a) La resistencia a la conformación
b) La resistencia a la tracción
c) El módulo de Young
d) La resistencia a la ruptura
e) Si el material era frágil o dúctil
f) El módulo de resiliencia

15. Se ha colocado una muestra de 1 pie de largo por 1 pulgada de diámetro en un aparato de viga voladiza. Se le añaden diferentes pesos a la muestra y el número de ciclos para la falla en cada peso fue registrada para producir la siguiente tabla:

Peso aplicado (lb)	Ciclos para la falla
1	2 000 000
5	385 000
10	75 000
15	17 000
20	5 000
25	1 100

Genere una gráfica S-N y calcule la vida de fatiga del material.

16. Una varilla de acero de .505 pulgadas de diámetro es sujeta a un ensayo de tracción. Si la resistencia a la ruptura del acero fuera de 50 klb/plg^2 y el diámetro final de la varilla fuera de 0.460 pulgadas, determine el esfuerzo real y el porcentaje de reducción en el área.

17. El ensayo de fluencia se lleva a cabo en un material a dos diferentes temperaturas. A 473 Kelvin (K), el tiempo de falla fue de 200 minutos, mientras que el tiempo de falla fue de 145 minutos a 573 K. Si el parámetro de Larson-Miller para el material es de 100, determine las constantes empíricas A y B.

18. Una serie de 10 ensayos de fluencia proporcionaron parámetros de Larson-Miller de 46, 49, 48, 48, 45, 44, 49, 50, 46 y 44 para un material. Después de permanecer guardadas en un cajón por un año, las muestras del mismo material fueron probadas nuevamente para el comportamiento de fluencia. Esta vez los resultados de los 10 ensayos fueron de 42, 46, 48, 44, 42, 41, 45, 46, 44 y 42. ¿Puede el investigador demostrar con 95% de certeza que el comportamiento de fluencia del material cambió por estar guardado un año?

19. Una muestra de .505 pulgadas de diámetro falló en la compresión bajo una carga de 50 klb/plg^2. Determine la resistencia a la compresión del material y prediga la naturaleza de la falla si L/D = 4.

20. Se lleva a cabo un ensayo de plegado en tres puntos sobre una muestra de material frágil con 10 pulgadas de longitud, 1 pulgada de ancho y 0.5 pulgadas de espesor. Si da como resultado una fuerza de 2 000 lb/plg^2 en una desviación de 0.05 pulgadas antes de la falla, determine la resistencia y el módulo de flexión de la muestra.

21. Una muestra con un módulo de flexión de 400 GPa se coloca sobre un ensayo de plegado en tres puntos. Si la muestra es de 20 cm de largo, 2 cm de espesor y 4 cm de ancho y resulta una desviación de .08 cm antes de romperse, determine la resistencia a la flexión del material.

22. Explique por qué el ensayo de plegado se utiliza en lugar de un ensayo de tracción para los materiales frágiles.

23. ¿Por qué la ASTM especifica el tipo de pelota que se debe utilizar en un ensayo Brinell? ¿Podría el cobre haber sido una elección razonable? ¿Qué pasa con el diamante?

24. ¿Cómo cambia el rango de fluencia cuando un material pasa de una fluencia primaria, a una secundaria y a una terciaria?

25. ¿Cómo puede ser un esfuerzo local en la imperfección diferente a una imperfección circular comparada con una imperfección elíptica que era seis veces más larga que su grosor máximo?

26. Para las siguientes aplicaciones, determine cuáles propiedades son más importantes para medir y explique por qué:

a) Parachoques de automóviles

b) Sogas para escalar

c) Repisas para libros

d) Alas de los aviones

e) Balatas

27. Si llevar a cabo múltiples pruebas reduce el error e incrementa la confianza en los resultados, ¿por qué no realizar muchas de cada uno de los ensayos para cada material?

28. Explique la diferencia entre el factor de concentración del esfuerzo y el factor de intensidad del esfuerzo.

29. ¿Cuál es el propósito de un estudio de envejecimiento acelerado?

30. ¿Por qué se utilizan diferentes tamaños de pelotas para los ensayos Brinell en materiales muy duros y muy suaves?

31. Explique por qué los materiales fallan después de varios ciclos aun cuando el esfuerzo máximo nunca sobrepasa la resistencia a la conformación del material.

32. ¿Por qué la tenacidad a la fractura del metal es más alta que la tenacidad a la fractura del vidrio?

33. Si la resistencia a la tracción de una muestra cae de 850 MPa a 775 MPa cuando se expone a 400º C por 100 horas y de 850 MPa a 775 MPa cuando se expone a 500º C por 60 horas, calcule la resistencia a la tracción del material si fuera expuesto a 150º C por 60 horas y por 2 000 horas.

34. Sugiera una aplicación en donde el comportamiento de la fluencia de un polímero fuera un parámetro importante.

35. ¿Por qué es importante filtrar un metal o polímero fundido antes de darle forma como un producto final?

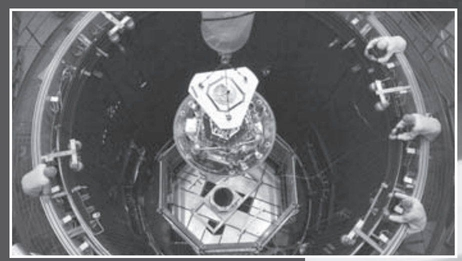
36. Una placa relativamente gruesa de aluminio o de acero debe ser capaz de soportar una tensión aplicada de 100 MPa. Basado en la información de la siguiente tabla, estime el tamaño máximo de la imperfección permitido en la placa de aluminio y en la placa de acero, después explique la causa de la diferencia en los números.

Propiedad	Acero	Aluminio
Módulo de elasticidad (GPa)	200	70
Energía específica de la superficie (J/m^2)	0.32	0.29



Metales

Digital Vision









CONTENIDO

Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el alumno debe ser capaz de:

- Explicar las cuatro operaciones primarias de forjado.
- Explicar por qué sucede el endurecimiento por deformación, describir su influencia sobre las propiedades y calcular el porcentaje de trabajo en frío.
- Explicar los cambios que ocurren en un metal endurecido por deformación durante las tres etapas de recocido: recuperación, recristalización y crecimiento del grano.
- Explicar las diferencias entre trabajo en caliente y trabajo en frío.
- Leer un diagrama de fase, incluyendo el etiquetamiento del tipo de sistema, la línea de líquidus, la línea de sólidus, cualesquiera puntos eutécticos y cualesquiera puntos eutectoides.
- Calcular la composición de fase en cualquier región de dos fases.
- Explicar todos los símbolos en el diagrama de fase de hierro-carbono, incluyendo la identidad y propiedades de cada fase.
- Explicar el proceso general de la manufactura del acero.
- Identificar las microestructuras y propiedades asociadas con los productos de desequilibrio del acero.

- Utilizar la gráfica *T-T-T* para calcular las transiciones de fase.
- Explicar los procesos involucrados en el endurecimiento por deformación.
- Identificar las propiedades únicas del cobre y sus aleaciones principales: latón y bronce.
- Identificar las propiedades únicas del aluminio y sus aleaciones principales.
- Comentar los factores que influencian la corrosión.
- Identificar las formas principales de corrosión y las formas de minimizar su efecto.
- Explicar el reciclaje de las latas de aluminio.

¿Cómo trabajar con los metales?

| *Fundido* |
Proceso por el cual se refinan los óxidos metálicos en metales puros.

| *Operaciones de conformado* |
Técnicas para alterar la forma de los metales sin derretirse.

| *Forjado* |
Proceso mecánico para darle nueva forma al metal.

| *Laminado* |
Adelgazamiento de una hoja de metal al presionarla entre dos rodillos, cada uno aplicando una fuerza de compresión.

| *Extrusión* |
Proceso en el que un material es empujado a través de un troquel, logrando que el material tome la misma forma del orificio en el troquel.

| *Trefilado* |
Deformación de un material arriba de su tensión de fluencia pero debajo de la temperatura de recristalización, resultando en una mayor tensión de fluencia pero menor ductilidad.

4.1 OPERACIONES DE CONFORMADO

La mayoría de los metales se encuentran en la naturaleza como óxidos metálicos. Estos óxidos metálicos se refinan en metales puros a través de un proceso llamado ***fundido*** en el cual el metal se extrae de su óxido a través del uso de un agente reductor químico. Una vez que el metal puro se forma, éste es procesado hacia la forma deseada mediante las ***operaciones de conformado*** que incluyen el ***forjado,*** el ***laminado,*** la ***extrusión*** y el ***trefilado*** como se muestra en la tabla 4-1. El forjado es dar nuevamente forma al metal de manera mecánica mediante la percusión o la presión. El herrero medieval golpeando una herradura para darle forma es un ejemplo clásico del forjado, pero en el ámbito industrial moderno, un metal virgen es forjado en una forma final al presionarlo entre placas de troqueles. El laminado involucra el adelgazamiento de una hoja de metal al presionarla entre dos rodillos. La reducción de su grosor obtenido por el laminado puede ser muy grande. El papel aluminio se produce mediante el laminado de lingotes gruesos de aluminio. La extrusión de metales es similar al proceso de extrusión para los polímeros descritos en el capítulo 5. El metal se empuja a través de un troquel, obteniendo así la forma del orificio. El trefilado es similar a la extrusión, solo que el metal se jala a través del troquel desde abajo en lugar de ser empujado desde arriba.

La tensión impuesta al material durante el conformado resulta en el endurecimiento por deformación o ***trabajo en frío***. Cuando el metal es expuesto a tensiones por arriba de su resistencia a la conformación, experimenta una deformación plástica significativa. Subsecuentemente, cuando la tensión es liberada, el material seguirá una curva lineal paralela a la porción elástica de la curva de esfuerzo-deformación original. Sin embargo, la resistencia a la conformación del metal ha llegado al nivel de tensión experimentado. En esencia,

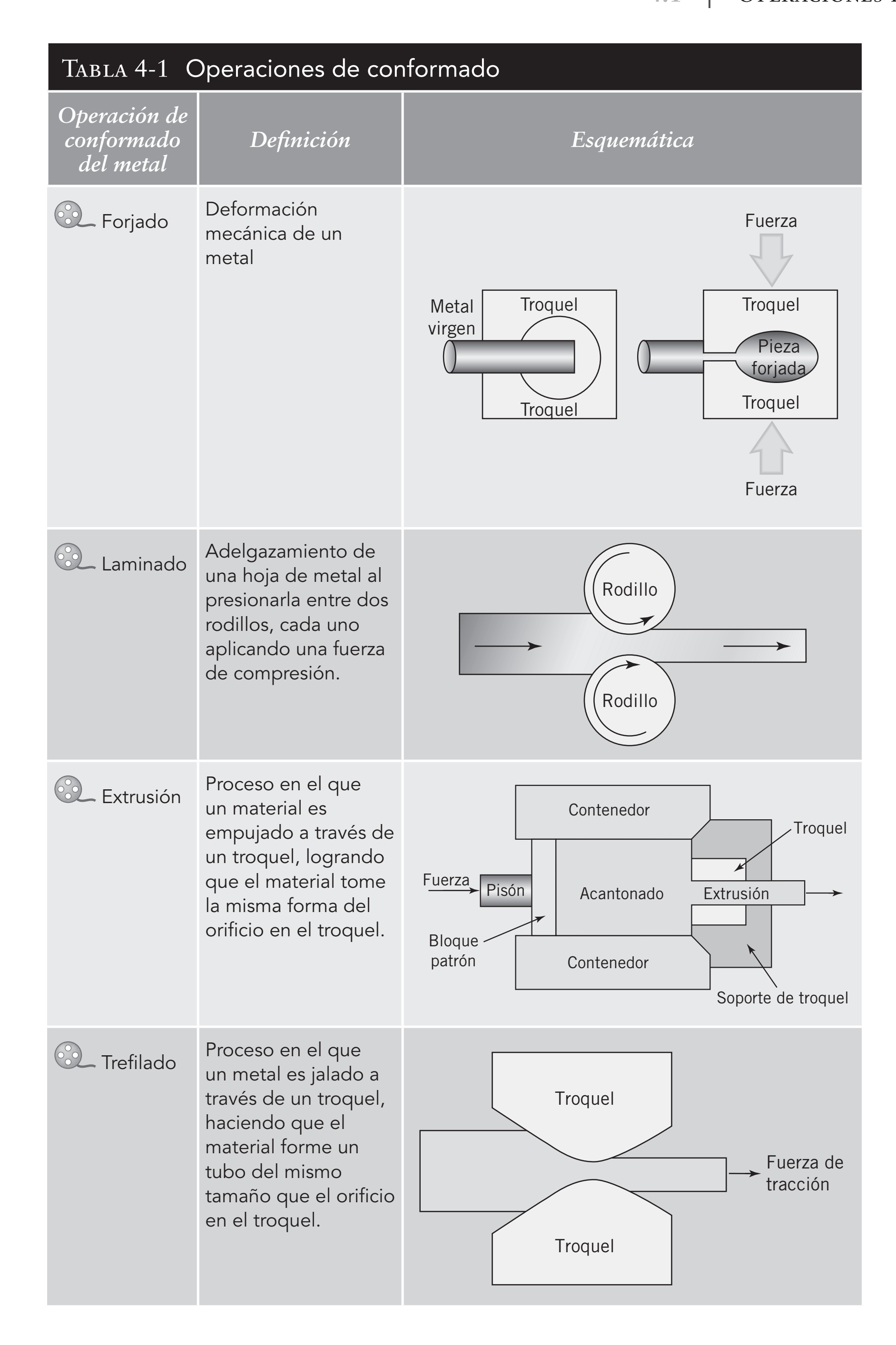


Tabla 4-1 Operaciones de conformado

Operación de conformado del metal	*Definición*	*Esquemática*
Forjado	Deformación mecánica de un metal	Fuerza; Metal virgen; Troquel; Troquel; Troquel; Pieza forjada; Troquel; Fuerza
Laminado	Adelgazamiento de una hoja de metal al presionarla entre dos rodillos, cada uno aplicando una fuerza de compresión.	Rodillo; Rodillo
Extrusión	Proceso en el que un material es empujado a través de un troquel, logrando que el material tome la misma forma del orificio en el troquel.	Contenedor; Troquel; Fuerza; Pisón; Acantonado; Extrusión; Bloque patrón; Contenedor; Soporte de troquel
Trefilado	Proceso en el que un metal es jalado a través de un troquel, haciendo que el material forme un tubo del mismo tamaño que el orificio en el troquel.	Troquel; Fuerza de tracción; Troquel

la microestructura del material deformado para soportar la tensión impuesta puede soportar el mismo nivel otra vez sin deformación adicional. La figura 4-1 ilustra el cambio en la resistencia a la conformación de un metal que experimenta el endurecimiento por deformación. Observe que la pendiente de la curva de esfuerzo-deformación no cambia pero la carga en la cual la deformación plástica comienza de nuevo, sí cambia.

| ***Trabajo* en *frío*** |
Deformación de un material arriba de su resistencia a la conformación pero debajo de la temperatura de recristalización, resultando en una mayor resistencia a la conformación pero menor ductilidad.

| ***Porcentaje del trabajo en frío* (%CW)** |
Representación de la cantidad de deformación plástica experimentada por un metal durante el endurecimiento por deformación (trabajo en frío).

La cantidad de deformación plástica experimentada por el metal se representa a menudo como el ***porcentaje del trabajo en frío (%CW)***, que está dado por la fórmula

$$\%CW = \left(\frac{A_0 - A_d}{A_0}\right) * 100\%, \tag{4.1}$$

en donde A_0 es el área transversal inicial y A_d es el área transversal posterior a la deformación.

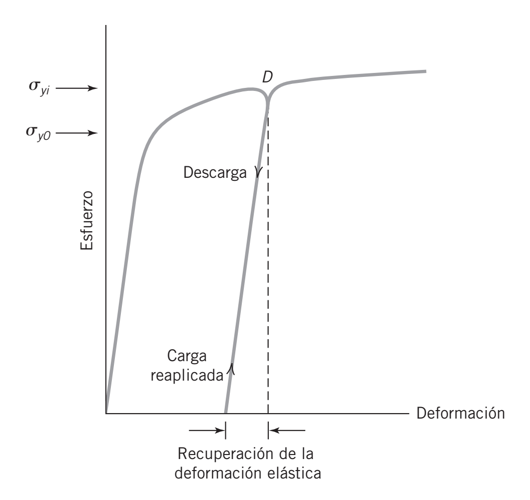




Figura 4-1 Influencia del endurecimiento por deformación (trabajo en frío) sobre la resistencia a la conformación.

Adaptado de William Callister, Materials Science and Engineering: An Introduction, *6a ed. (Hoboken, NJ: John Willey & Sons, 2003).*

| ***Recocido*** |
Proceso de tratamiento de calor que revierte los cambios en la microestructura de un metal después de un trabajo en frío; sucede en tres etapas: recuperación, recristalización y crecimiento del grano.

Ejemplo 4-1

Calcular el porcentaje del trabajo en frío para una muestra de un cilindro metálico cuyo diámetro se ha reducido de 10 cm a 8 cm a través de una operación de conformado.

SOLUCIÓN

$$\%CW = \left(\frac{A_0 - A_d}{A_0}\right) * 100\% = \left(\frac{\pi(10/2)^2 - \pi(8/2)^2}{\pi(10/2)^2}\right) * 100\%$$

$$\%CW = 36\%$$

Muchos metales comerciales pasan a través del proceso de endurecimiento por deformación para mejorar las propiedades mecánicas, pero no todo acerca del endurecimiento por deformación es benéfico para el metal. El metal endurecido se hace menos dúctil y es más difícil de maquinar. Adicionalmente, la deformación plástica puede resultar en esfuerzos residuales que permanecen en el material aun después de que los esfuerzos externos se han liberado. Estos esfuerzos pueden impactar la conductividad y la resistencia a la corrosión.

El cambio en la microestructura del metal durante el trabajo en frío se puede revertir a través de un proceso térmico (de calor) llamado ***recocido***, que también revierte las propiedades mecánicas a su estado original. El recocido sucede

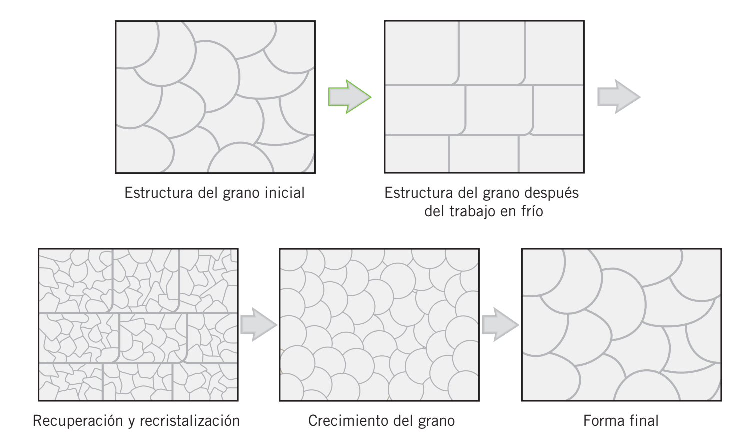




Figura 4-2 Recuperación, recristalización y crecimiento del grano

en tres etapas: ***recuperación, recristalización*** y ***crecimiento del grano*** como se muestra en la figura 4-2. El metal endurecido por esfuerzo contiene granos que fueron deformados mediante la aplicación de tensión como se muestra en la figura. Durante la primera etapa del tratamiento térmico (recuperación), estos grandes granos deformes forman subgranos que resultan en una disminución de los esfuerzos residuales en el material como se muestra. La densidad total de la dislocación no cambia durante la recuperación para que las propiedades mecánicas permanezcan virtualmente sin cambios, pero las conductividades se revierten a sus estados originales.

Cuando el material se calienta hasta su ***temperatura de recristalización***, la nucleación de pequeños granos ocurre en las fronteras de subgrano, dando por resultado una reducción significativa en el número de dislocaciones presentes en el metal. La temperatura de recristalización marca la transición entre la primera etapa (recuperación) y la segunda etapa (recristalización). El impacto de la recristalización es significativo. El metal se revierte hacia sus propiedades originales, haciéndose más suave y débil, pero más dúctil.

La identificación de la temperatura de recristalización de un material es difícil. La recristalización es un fenómeno cinético que varía con la temperatura y el tiempo. Un cierto grado de recristalización comienza durante la recuperación y otro más continúa en la tercera etapa (crecimiento del grano). La temperatura de recristalización varía con la cantidad de trabajo en frío que el metal experimentó. Los granos en un metal que han experimentado trabajo en frío sustancial son menos estables, lo que hace más favorable la nucleación de nuevos granos. Para la mayoría de los metales, hay un nivel mínimo de trabajo en frío (generalmente de 2 a 20 por ciento) por debajo del cual la recuperación no puede ocurrir. Debajo de este nivel de deformación, la energética no es suficientemente favorable como para soportar la nucleación de nuevos granos. La temperatura de recristalización también varía con el tamaño inicial del grano y la composición del metal o de la aleación.

La etapa final del recocido, el crecimiento del grano, consiste de pequeños granos que crecen y que consumen en última instancia granos vecinos como se muestra en la figura 4-2. El proceso es directamente análogo al del crecimiento granular comentado ya en el capítulo 3 y por lo general es indeseable debido al impacto negativo del tamaño del grano grande sobre sus propiedades mecánicas. Finalmente, la microestructura del material recocido se asemeja mucho a la microestructura original antes de la deformación plástica. Sin embargo, el tamaño del grano puede aumentar más allá del tamaño original del material recocido (pretrabajado en frío) durante demasiado tiempo o a una temperatura muy alta.

| ***Recuperación*** |
Primera etapa del recocido en la cual grandes granos deformes forman un material y los esfuerzos residuales se reducen.

| ***Recristalización*** |
Segunda etapa del recocido en la cual ocurre la nucleación de pequeños granos en las fronteras de los subgranos, dando por resultado una reducción significativa en el número de dislocaciones presentes en el metal.

| ***Crecimiento del grano*** |
Segundo paso en la formación de cristalitas, el cual depende de la temperatura y puede ser descrito utilizando la ecuación de Arrhenius.

| ***Temperatura de recristalización*** |
Temperatura que marca la transición entre la recuperación y la recristalización.

| *Trabajo en caliente* |
Proceso en el cual las operaciones de formado se desempeñan por arriba de la temperatura de recristalización del metal. Dicha recristalización ocurre de forma continua y el material se puede deformar plásticamente de manera indefinida.

Cuando las operaciones de conformado comentadas en esta sección son llevadas a cabo por arriba de la temperatura de recristalización del metal, el proceso se llama ***trabajo en caliente***, y el impacto en la microestructura es sustancialmente diferente. Durante el trabajo en caliente, la recristalización ocurre en forma continua y el material se puede deformar plásticamente de manera indefinida. Ninguna resistencia resulta de la deformación plástica y el material sigue siendo dúctil. Cuando se solicita que se nombre un metal dúctil, fácilmente conformado, mucha gente piensa en el plomo. La razón por la cual el plomo se moldea tan fácil es porque su temperatura de recristalización está significativamente por debajo de la temperatura ambiente. El plomo continuamente se recristaliza durante las operaciones de conformado y sigue siendo maleable.

¿Qué ventajas ofrecen las aleaciones?

4.2 ALEACIONES Y DIAGRAMAS DE FASE

| *Aleaciones* |
Mezcla de dos o más metales.

Las ***aleaciones*** son mezclas homogéneas de un metal con uno o más metales o no metales, formando con frecuencia una solución sólida. Al seleccionar cuidadosamente la composición de la aleación y las condiciones de los procesos, los científicos e ingenieros de materiales, pueden desarrollar materiales con un rango más amplio de propiedades que las logradas a partir de los metales puros. La tabla 4-2 enlista las aleaciones metálicas más comunes.

| *Solubilidad* |
Cantidad de una sustancia que puede ser disuelta en una cantidad determinada de solvente.

Una solución sólida es fundamentalmente la misma que otras soluciones que son más familiares. Cuando se vierte agua caliente sobre granos de café, algunos de los componentes de dichos granos son vertidos en una solución junto con el agua. La solución resultante, el café, es una mezcla equilibrada de los componentes del café y del agua. La ***solubilidad*** de los componentes del café en el agua varía con la temperatura. Se filtrará más en el agua a alta temperatura que a baja temperatura, por lo que el café se hace con agua muy caliente. Los metales se comportan, por mucho, de la misma manera. Si el cobre y el estaño fundidos se mezclan, el estaño es soluble en el cobre y resulta la aleación del latón.

TABLA 4-2 Aleaciones metálicas comunes

Nombre	*Composición (%)*
Aleación de aluminio 3S	98 Al, 1.25 Mn
Bronce de aluminio	90 Cu, 10 Al
Oro 8 quilates	47 Cu, 33 Au, 20 Ag
Oro paladio	40 Cu, 31 Au, 19 Ag, 10 Pd
Bronce manganeso	95 Cu, 5 Mn
Bronce, metal brillante	67 Cu, 33 Sn
Latón rojo	85 Cu, 15 Zn
Oro 14 quilates	58 Au, 14-28 Cu, 4-28 Ag
Oro platino, blanco	60 Au, 40 Pt
Acero	99 Fe, 1 C
Acero inoxidable 316	63-71 Fe, 16-18 Cr, 10-14 Ni, 2-3 Mo, 0.4 Mn, 0.03 C
Papel de estaño	88 Sn, 8 Pb, 4 Cu, 0.5 Sb

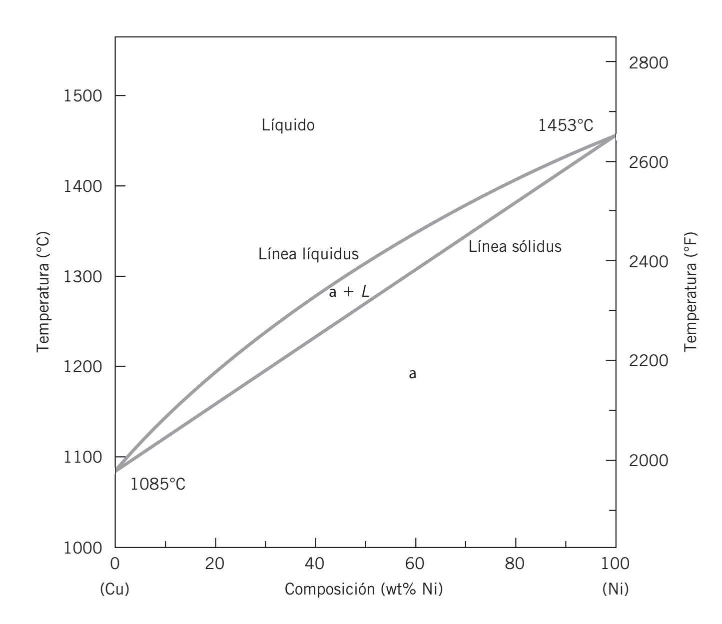


Figura 4-3 Diagrama de fase isomórfico binario para aleaciones de cobre-níquel

De P. Nash, ed., Phase Diagrams of Binary Nickel Alloys, *ASM International, Materials Park. OH. Reimpreso con permiso de ASM International.*

Para comprender las soluciones sólidas, es necesario primero, revisar algo de química básica. Una ***fase*** se define como cualquier parte de un sistema física y químicamente homogénea y posee una interfaz definida con cualquiera de las fases circundantes. Una fase puede consistir de un solo componente o de múltiples componentes. Las fases presentes en la mayoría de los metales en equilibrio varían con la composición y la temperatura. Un ***diagrama de fase*** proporciona abundante información sobre dichas fases. Los diagramas de fase se clasifican con base en el número de materiales y de la naturaleza del equilibrio entre las fases. El más simple es un sistema ***isomórfico binario*** como el que se muestra en la figura 4-3.

| *Fase* |
Cualquier parte de un sistema que es física y químicamente homogénea y que posee una interfaz definida con cualquiera de las fases circundantes.

| *Diagrama de fase* |
Representación gráfica de las fases presentes en el equilibrio como función de la temperatura y la composición.

| *Isomórfico binario* |
Aleación de dos componentes con una fase sólida y una fase líquida.

El diagrama se clasifica como binario puesto que sólo dos especies (cobre y níquel) están presentes en la aleación y es isomórfico porque sólo están presentes una fase sólida y una líquida. Otras aleaciones metálicas tienen diagramas más complicados, pero todas proporcionan fundamentalmente el mismo tipo de información.

El diagrama de fase indica cuáles fases están presentes en cualquier temperatura y composición y se puede utilizar para determinar cómo las fases presentes cambiarán según la aleación metálica sea calentada o enfriada. Considere 50 wt% de una mezcla de cobre y níquel. El diagrama de fase en la figura 4-4 muestra que una sola fase metálica (α) existirá en todas las temperaturas por abajo de los 2 300°F. Al tiempo que la temperatura va aumentando, la línea más baja del gráfico se va cruzando y algunos materiales se derretirán, resultando en una fase líquida en equilibrio con el sólido α. Apenas arriba de los 2 400°F, el último sólido se derretirá mientras la línea superior se cruza y quedará una sola fase líquida (L). La línea más baja se llama ***línea de sólidus*** bajo la cual los sólidos solamente existen en equilibrio. La línea superior se llama ***línea de líquidus*** bajo la cual solamente existen los líquidos.

| *Línea de sólidus* |
Línea en un diagrama de fase debajo de la cual los sólidos solamente existen en equilibrio.

| *Línea de líquidus* |
Línea en un diagrama de fase encima de la cual el líquido solamente existe en equilibrio.

En las regiones donde existe más de una fase al mismo tiempo, el diagrama de fase también provee información sobre la composición de las dos fases. Considere el mismo 50% de la mezcla de cobre y níquel. A 1 280°C, el diagrama de fase en la figura 4-4 indica que existen ambas fases, la líquida (L) y la sólida (α). Aunque el 50 wt% del material total sea níquel, las dos fases tendrán

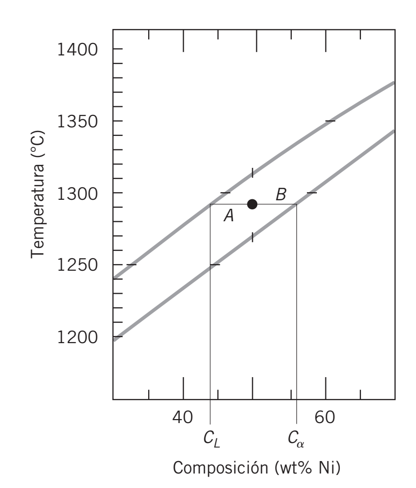


Figura 4-4 Agrandamiento de la región de interés del diagrama de fase de cobre-níquel

| *Línea de unión* | Línea horizontal de temperatura constante que pasa a través del punto de interés.

diversas cantidades. Las composiciones se revelan mediante la construcción de una ***línea de unión***, que es simplemente una línea horizontal de la temperatura constante que pasa a través del punto de interés. La intersección de la línea de unión y de la curva de equilibrio entre las fases proporciona las composiciones de la fase.

Como muestra la ampliación en la figura 4-4, la línea de unión interseca la línea de líquidus a 43wt% del níquel y la línea de sólidus a 56 wt% del níquel. Los puntos de intersección indican que la fase líquida contendrá 43 wt% de níquel y 56 wt% de cobre, mientras que la fase α sólida consistirá en 56 wt% de níquel y 44 wt% de cobre.

Un equilibrio de masa total y el equilibrio de masa especie en el níquel proporcionan la cantidad total de material en cada fase. La masa de la fase sólida (M_α) más la masa de la fase líquida (M_L) produce la masa total (M_T),

$$M_\alpha + M_L = M_T. \tag{4.2}$$

Similarmente, se sabe que todo el níquel debe estar ya sea en la fase sólida o en la fase líquida. Por lo tanto, la fracción de peso del níquel en la fase sólida (w_α) multiplicada por la masa de la fase sólida (M_α), más la fracción de peso del níquel en la fase líquida (w_L) multiplicada por la masa de la fase líquida (M_L), debe ser igual a la masa total (M_T) multiplicada por la fracción total de peso del níquel (w_T), como se muestra en la ecuación 4.3:

$$w_\alpha M_\alpha + w_L M_L = w_T M_T \tag{4.3}$$

| *Regla de la palanca* | Método para determinar las composiciones de materiales en cada fase usando las líneas de unión segmentadas que representan todos los porcentajes de peso de los diferentes materiales.

Aunque cada problema de la composición de la fase binaria se pueda resolver mediante un balance de masa total y el balance de masa especie, con frecuencia se utiliza un procedimiento conocido como la ***regla de la palanca***. La figura 4-5 muestra la misma línea de unión usada en el ejemplo anterior pero con la línea de unión segmentada. El primer segmento que se extiende desde la línea de líquidus al porcentaje total de peso del níquel está marcada como A, mientras que el segmento desde el porcentaje total de peso hasta línea de sólidus está marcada con B. Con una base de 1 gramo de material, la masa de cada fase se puede calcular a partir de las ecuaciones 4.4 y 4.5:

$$M_\alpha = \frac{B}{A + B} \tag{4.4}$$

Ejemplo 4-2

Determine la cantidad de material en las fases líquida y sólida para una aleación de 50 wt% de cobre y 50 wt% de níquel a 1 280°C.

SOLUCIÓN

Seleccione una base de 1 gramo de material total (M_T = 1 gramo). El planteamiento del problema establece que w_T = 50%. La línea de unión en la figura 4-4 muestra que w_α = 56% y w_L = 43%. Las ecuaciones 4.2 y 4.3 se convierten en

$$M_\alpha + M_L = 1 \text{ gramo}$$

y

$$(0.56)M_\alpha + (0.43)M_L = (0.5)(1 \text{ gramo}).$$

Esto deja dos ecuaciones y dos incógnitas, así que las ecuaciones se pueden resolver de forma simultánea:

$$M_L = 1 \text{ g} - M_\alpha$$

$$(0.56)M_\alpha + (0.43)(1 \text{ g} - M_\alpha) = 0.5$$

$$M_\alpha = 0.538 \text{ g},$$

entonces

$$M_L = 1 \text{ g} - M_\alpha = 0.462 \text{ g}.$$

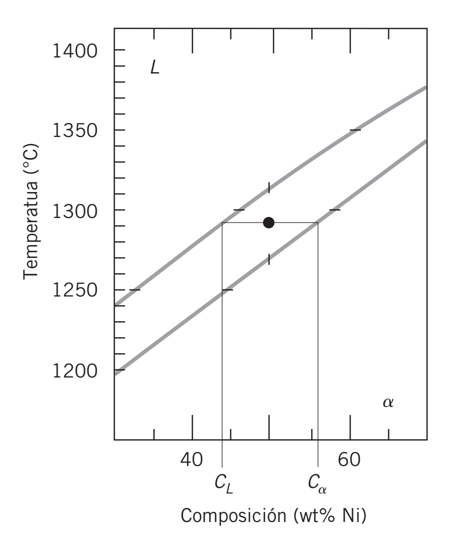


Figura 4-5 Sistema de cobre-níquel con una etiqueta de línea de unión para su uso con la regla de la palanca

Ejemplo 4-3

Determine la masa del líquido y sólido (α) en 1 gramo de una aleación 50 wt% de níquel y cobre a 1280°F utilizando la regla de la palanca.

SOLUCIÓN

$$M\alpha = \frac{B}{A + B} = \frac{0.56 - 0.50}{(0.50 - 0.43) + (0.56 - 0.50)} = 0.462 \text{ g}$$

$$M_L = \frac{A}{A + B} = \frac{0.50 - 0.43}{(0.50 - 0.43) + (0.56 - 0.50)} = 0.538 \text{ g}$$

Obviamente, el resultado es el mismo cuando es calculado por la regla de la palanca o por los balances directos de masa.

y

$$M_L = \frac{A}{A + B}. \tag{4.5}$$

| *Difusión* |
Movimiento neto de los átomos en respuesta a un gradiente de concentración.

| *Primera ley de Fick* |
Ecuación que determina la difusión del estado estacionario.

| *Difusividad* |
Coeficiente dependiente de la temperatura en relación con el flujo neto para un gradiente de concentración.

Los diagramas de fase representan un estado de equilibrio, pero toma tiempo para que los átomos de la red cristalina se realineen. El movimiento significativo de moléculas debe ocurrir a través de un proceso llamado ***difusión***, en el cual un gradiente de concentración conduce un flujo neto de átomos desde la región de mayor concentración hacia aquél de poca concentración. Cada uno de nosotros está familiarizado con la difusión en gases y líquidos. El olor de cocinar un alimento se difunde desde el recipiente hasta su nariz, o las moléculas del perfume se difunden desde una botella abierta a toda la habitación. En los líquidos, una gota de colorante de alimento rojo se difunde a través de una taza de agua hasta que la mezcla entera se torna roja. La difusión en sólidos trabaja muy parecido a las difusiones en líquidos o gases, pero a tasas mucho más lentas. Para los sistemas de estado estacionario, la ***primera ley de Fick*** nos muestra que

$$J_A = -D_{AB}\frac{dC_A}{dx}, \tag{4.6}$$

en donde J_A es el flujo neto (átomos por área-tiempo) de moléculas del material A difundido en la dirección x, debido a un gradiente de concentración (dC_A/dx). El término D_{AB} es la ***difusividad*** y representa qué tan fácil las moléculas se pueden difundir del material A a través del material B.

La difusividad es impactada fuertemente por la temperatura. A mayor temperatura, mayor energía para el movimiento molecular, y un incremento correspondiente en las tasas de difusión. La difusividad también es impactada por la estructura de cristal de la red cristalina del solvente. Por ejemplo, el carbono se difundirá más fácilmente en una estructura cúbica centrada (BCC) que en una estructura cúbica de caras centradas (FCC), aunque la estructura FCC puede sostener un carbono más intersticial.

A diferencia de los líquidos o de los gases, los sólidos tienen dos mecanismos distintos de difusión, y el tipo de mecanismo también afecta consistentemente la difusividad. Cuando los átomos (en este caso átomos de carbono) se difunden a partir de un sitio intersticial a otro sin la alteración de la red

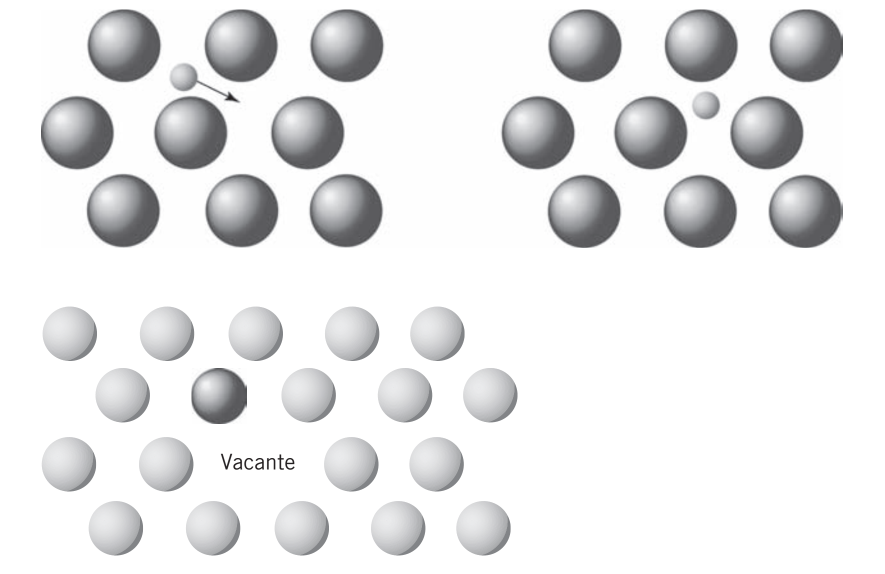




Figura 4-6 Difusión de una intersticial desde su posición inicial a) hasta su posición final b)



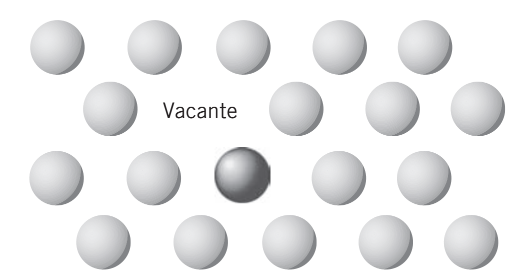




Figura 4-7 Difusión de la vacante en los metales

cristalina misma, como se muestra en la figura 4-6, el proceso se llama ***difusión intersticial***. Se necesita suficiente energía de activación para permitir que el átomo intersticial más pequeño se trasmine entre los átomos más grandes de la matriz.

| ***Difusión intersticial*** | Movimiento de un átomo a partir de un sitio intersticial a otro, sin alterar la red cristalina.

Cuando los átomos en la red cristalina se trasladan por sí mismos a nuevas posiciones, el proceso se llama ***difusión de la vacante o difusión sustitucional***. En este caso, la red cristalina de un átomo de hierro "brinca" hacia una red cristalina vacante dejando una nueva vacante detrás como se muestra en la figura 4-7. Mientras que la temperatura aumenta, la difusividad aumenta y más vacantes están disponibles, así que el flujo de la difusión aumenta en forma sustancial.

| ***Difusión de la vacante*** | Movimiento de un átomo por sí mismo dentro de la red cristalina en un sitio desocupado.

Sin importar el tipo de mecanismos de la difusión, toda difusión se relaciona con el movimiento de átomos o de moléculas desde regiones de una concentración más alta hacia aquellas de concentraciones más bajas. La fuerza impulsora para la difusión no es el uso de una fuerza física que hace que los átomos se muevan, sino una respuesta a un gradiente de concentración.

La forma de la primera ley de Fick dada en la ecuación 4.6 representa un estado estacionario, pero muchas transiciones térmicas (incluyendo aquellas que ocurren durante su austenización) cambian con el tiempo. En tales casos, se requiere la forma de estado inestable conocida como la ***segunda ley de Fick***,

| ***Segunda ley de Fick*** | Ecuación que representa el cambio dependiente del tiempo en la difusión.

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{d[D_{AB}(dC_A/dx)]}{dx} \tag{4.7}$$

La solución de la ecuación diferencial parcial de segundo orden resultante va más allá del alcance de este texto, pero la idea de que la difusión cambia con el tiempo tiene un efecto significativo sobre las microestructuras finales. Considere el sistema de cobre-níquel comentado antes. Si una mezcla 50 wt% se enfría de 1350°C a 1280°C como en el ejemplo 4-3, el diagrama de fase indica que las composiciones de la fase de equilibrio de la fase sólida deberían ser níquel a 56%. Sin embargo, el primer sólido se comienza a formar a los 1310°C como se muestra en la figura 4-8. A esta temperatura, la fase sólida contendría cerca de 64% del níquel. A medida que la temperatura continúa cayendo, otra capa sólida con una concentración ligeramente más baja de níquel se forma en la creciente fase α. Porque la cantidad total de níquel en la fase sólida se encapsula a 56%, las capas exteriores del sólido se agotan en níquel, mientras que las capas internas se enriquecen en él. A la distribución no uniforme de elementos en la fase sólida debida a un enfriamiento no equilibrado se le llama *segregación* y se ilustra en la figura 4-9.

| *Eutéctico binario* |
Diagrama de fase que contiene seis regiones distintas: una líquida monofásica, dos regiones sólidas monofásicas (α y β) y tres regiones polifásicas (α y β, α y L y β y L).

El siguiente nivel de complejidad en diagramas de fase ocurre por sistemas ***eutéctico binarios*** como el sistema de plomo-estaño mostrado en la figura 4-10. La palabra *binario* de nuevo significa la presencia de dos componentes, en este caso el plomo y el estaño. La palabra *eutéctico* viene del griego "bien derretido". Los sistemas eutéctico binarios contienen seis regiones distintas: una líquida monofásica, dos regiones sólidas monofásicas (α y β) y tres regiones polifásicas ($\alpha + \beta$, α + L y β + L).

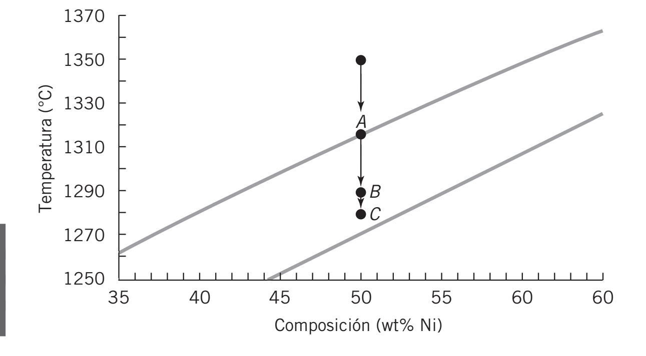


Figura 4-8 Enfriamiento no equilibrado de una aleación de cobre-níquel de 50 wt%: A) formación del primer sólido, B) enfriamiento intermedio y C) concentraciones de equilibrio finales

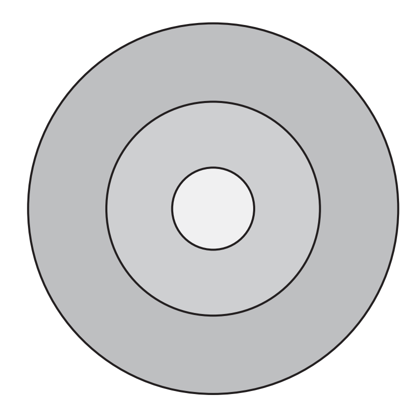




Figura 4-9 Segregación en una aleación de cobre-níquel (el color que se reduce indica reducción en la concentración de níquel)

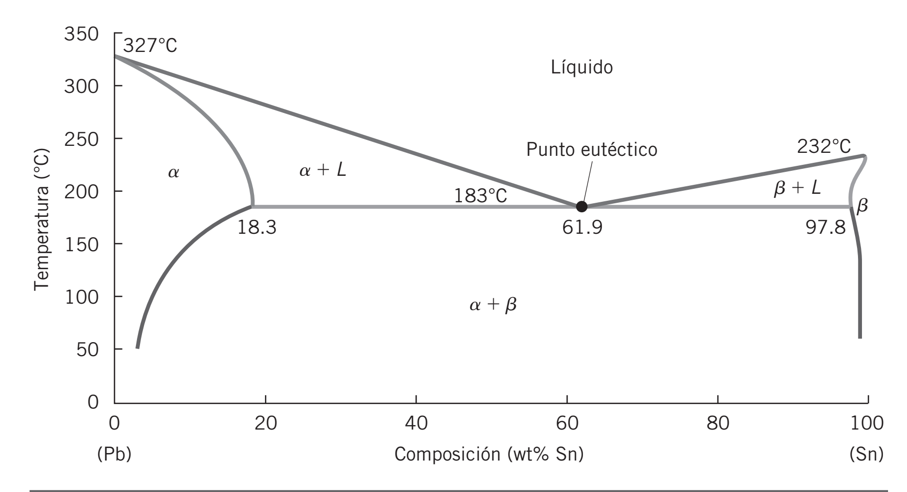


Figura 4-10 Diagrama de fase eutéctico binario de un sistema de plomo-estaño

De T.B. Massalski, ed., Binary Alloy Phase Diagrams, 2a ed., *Vol. 3,. ASM International, Materials Park. OH. Reimpreso con permiso de ASM International.*

La característica que define un sistema eutéctico binario es un ***eutéctico isotérmico*** horizontal que representa la porción de la línea de sólidus arriba de una solución sólida $\alpha + \beta$. En el caso del sistema del plomo-estaño, el eutéctico isotérmico sucede a los 183° C. En una concentración de estaño de 61.9 wt% existe un punto en el cual las fases $\alpha + \beta$ se derriten directamente para formar un líquido monofásico sin pasar a través de cualquier región $\alpha + L$ o $\beta + L$. El punto en el diagrama de fase donde ocurre este derretimiento directo se llama ***punto eutéctico***, y la temperatura y la composición correspondientes se conocen como la *temperatura eutéctica* (T_E) y la *composición eutéctica* (C_E).

Cuando el material pasa a través del punto eutéctico, sucede una reacción eutéctica. La forma general de la reacción eutéctica está dada por la ecuación

$$L(C_E) \leftrightarrow \alpha(C_{\alpha,E}) + \beta\,(C_{\beta,E}). \tag{4.8}$$

En el caso de la aleación de plomo y estaño, la reacción podría escribirse como

$$L(61.9\%\ \text{Sn}) \leftrightarrow \alpha\ (18.3\%\ \text{Sn}) + \beta\ (97.8\%\ \text{Sn}). \tag{4.9}$$

El diagrama más complicado resulta en descriptores adicionales para las diversas líneas de equilibrio en la gráfica. La línea de sólidus (mostrada en la figura 4-10), bajo la cual solo los sólidos existen, se extiende desde 327° C a lo largo de la frontera entre la fase α y la región $\alpha + L$, después continúa como el eutéctico isotérmico a 183° C, y forma la frontera entre las regiones β y $\beta + L$. *A* la línea roja que define la frontera entre la fase α pura y la fase $\alpha + \beta$ y la línea roja que define la frontera entre la fase β y la fase $\alpha + \beta$ se les llama ***líneas de solvus***.

El punto eutéctico es una clase particular de *punto invariante*, que es cualquier punto en un diagrama de fase en donde están tres fases en equilibrio. Otros dos tipos de puntos invariantes son los ***eutectoides***, en los cuales una fase sólida está en equilibrio con una mezcla de dos fases sólidas diferentes, y los ***peritécticos***, en los cuales un sólido y un líquido están en equilibrio con una fase sólida diferente. La tabla 4-3 resume los principales puntos invariantes.

| ***Eutéctico isotérmico*** |
Línea de temperatura constante en un diagrama de fase que pasa a través del punto eutéctico.

| ***Punto eutéctico*** |
Aquel que está en un diagrama de fase en el cual las dos fases sólidas se derriten completamente para formar una fase líquida monofásica.

| ***Líneas de solvus*** |
Líneas que definen el límite entre la fase sólida pura y una unión de dos fases sólidas en un diagrama de fase.

| ***Eutectoides*** |
Puntos en los cuales una fase sólida está en equilibrio con una mezcla de dos diferentes fases sólidas.

| ***Peritécticos*** |
Puntos en los cuales un sólido y un líquido están en equilibrio con una fase sólida diferente.

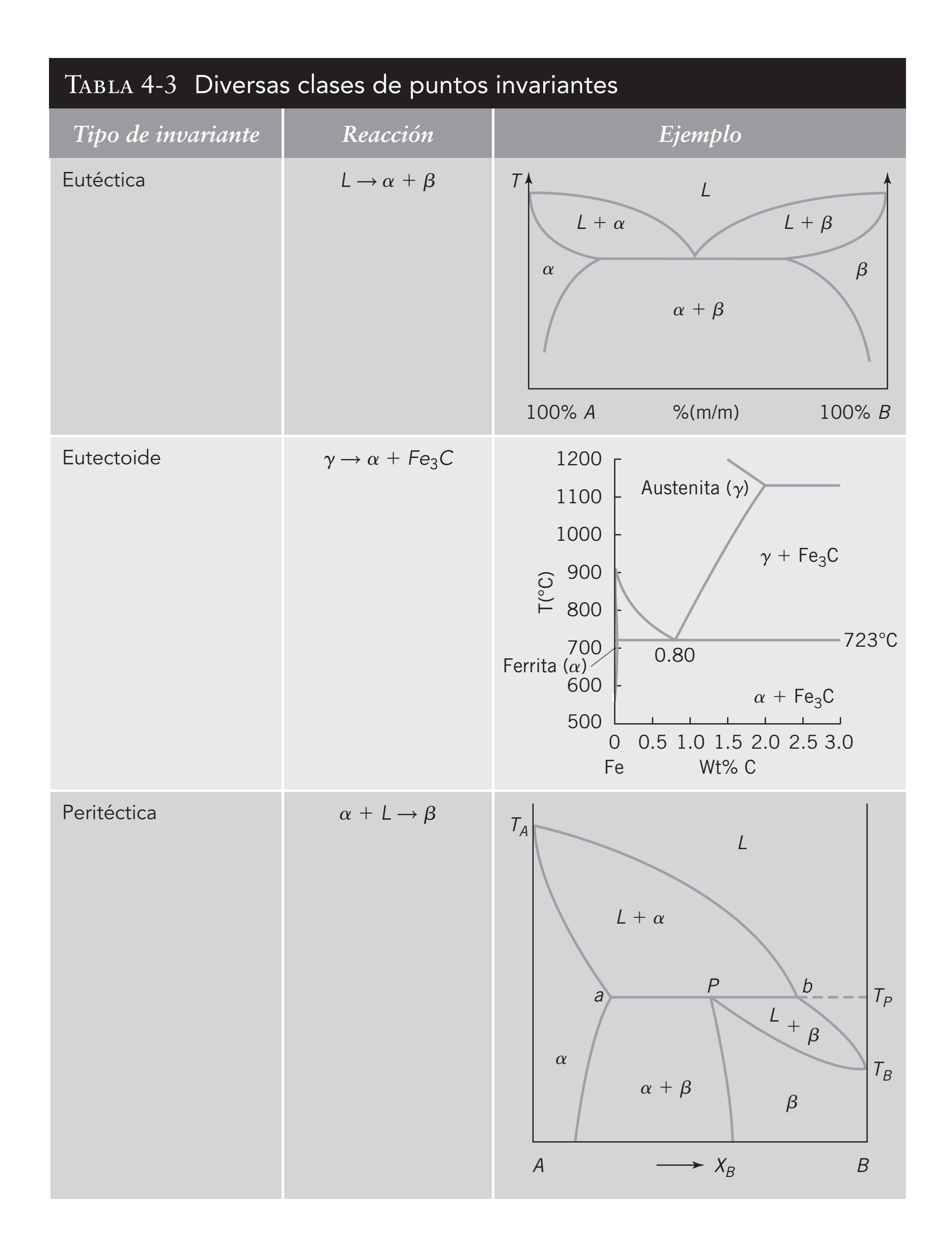


TABLA 4-3 Diversas clases de puntos invariantes

Tipo de invariante	*Reacción*	*Ejemplo*
Eutéctica	$L \rightarrow \alpha + \beta$	(diagrama)
Eutectoide	$\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$	(diagrama)
Peritéctica	$\alpha + L \rightarrow \beta$	(diagrama)

Todos los principios para leer los diagramas de fase y calcular las composiciones de fases se aplican al eutéctico binario. En cualquier región bifásica se puede dibujar una línea de unión horizontal para determinar las concentraciones del equilibrio de las dos regiones, y la regla de la palanca (o balances de masa) se puede aplicar para determinar la cantidad total de material en cada fase.

4.3 ACERO AL CARBONO

| *Acero al carbono* |
Aleación común que consiste de átomos de carbono intersticiales en una matriz de hierro.

Quizá no exista un metal tan ubicuo en las sociedades avanzadas como el ***acero al carbono***, el cual consiste de átomos de carbono intersticiales en una matriz de hierro. La figura 4-11 muestra un esquema del

Figura 4-11 Proceso de manufactura del acero

proceso de manufactura del acero. El acero se produce a partir de tres materias primas básicas: mineral de hierro, carbono y piedra caliza. El mineral de hierro proporciona todo el hierro en el sistema. Es granulado, ***sinterizado*** y se añade a un alto horno grande. Los componentes volátiles del carbono se eliminan a través de un proceso llamado *coquefacción*, y el material rico en carbono resultante es añadido al alto horno. Después del calentamiento, el mineral de hierro se reduce a hierro metálico y se emiten gases de dióxido de carbono y de monóxido de carbono. La piedra caliza pulverizada se agrega al derretimiento y forma una capa de escoria arriba del metal. La escoria ayuda a quitar impurezas del sistema. El metal resultante, llamado ***hierro bruto***, se trata entonces con oxígeno para remover el exceso de carbono y convertirse en acero. En general, la fabricación de 1 tonelada de hierro bruto requiere alrededor de 2 toneladas de mineral de hierro, 1 tonelada de coque y 500 libras de piedra caliza.

Como cualquier otro diagrama de fase, el sistema de hierro-carbono se podría extender desde 0% de carbono hasta 100%. Sin embargo, el porcentaje máximo del carbono dentro del acero es de 6.7 wt%. Sobre este límite, el carburo de hierro (Fe_3C) se precipita hacia afuera en una fase dura y frágil llamada ***cementita***. Como resultado, el diagrama de fase utilizado para analizar el acero es en realidad un diagrama de hierro-carburo de hierro y termina en un porcentaje de 6.7 de carbono como se muestra en la figura 4-12.

Las regiones de este diagrama de fase tienen distintas características. En la porción extrema inferior izquierda del diagrama de fase sucede una fase BCC ferrita α. Los átomos de hierro grandes acomodados en una red cristalina BCC dejan muy poco espacio para los átomos de carbono intersticiales, por lo tanto, sin sorpresas, la solubilidad del carbono en las regiones intersticiales de ferrita α es pequeña (alcanzando un máximo de 0.022%). En concentraciones más altas de carbono en la porción inferior derecha del diagrama existe una mezcla bifásica de ferrita α y cementita (Fe_3C). A esta mezcla se le llama ***perlita*** porque su superficie brillante y colorida se asemeja al nácar. La microestructura de la perlita consiste en alternar capas de cementita y de ferrita α como se muestra en la figura 4-13.

La fase de la ferrita δ a mano izquierda superior del diagrama de fase representa una estructura BCC muy similar a la ferrita α pero con una mucho mayor solubilidad del carbono (máximo 0.09%). Entre las fases ferrita α y δ, existe una fase FCC llamada ***austenita*** (g) con mucha más alta solubilidad del carbono (máximo 2.08%).

| ***Sinterizado*** |
Convertido en sólido a partir de partículas, calentándolas hasta que las partículas individuales se peguen.

| ***Hierro bruto*** |
Metal que queda en el proceso de fabricación de acero después de que las impurezas se han difundido en la escoria. Cuando se trata con oxígeno para quitar el exceso de carbono, el hierro bruto se convierte en acero.

| ***Cementita*** |
Fase dura y frágil del carburo de hierro (Fe_3C) que se precipita hacia afuera del acero, más allá del límite de la solubilidad del carbono.

| ***Perlita*** |
Mezcla de cementita (Fe_3C) y ferrita α llamada así por su semejanza con el nácar.

| ***Austenita*** |
Fase presente en el acero, dentro de la cual el hierro está presente en una red cristalina FCC con una solubilidad del carbono más alta.

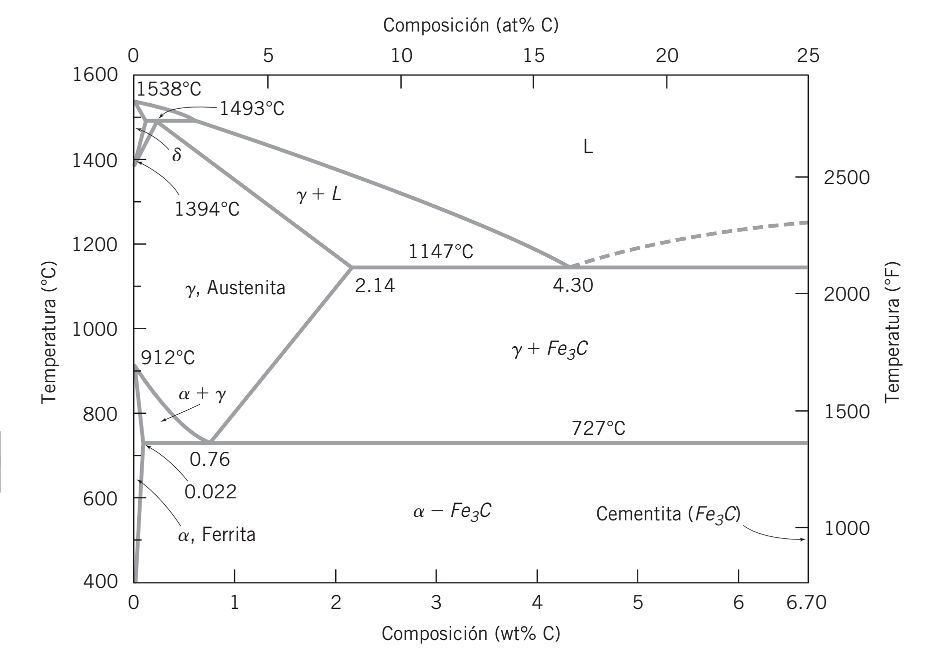


Figura 4-12 Diagrama de fase para el acero

De T.B. Massalski, ed., Binary Alloy Phase Diagrams, 2a ed. *Vol.3. ASM International, Materials Park. OH. Reimpreso con permiso de ASM International.*



Figura 4-13 Microestructura de la perlita

El diagrama de fase del acero contiene tres diferentes puntos invariantes.

1. Un eutectoide a 723°C y 0.76% de carbono.
2. Un eutéctico a 1 147°C y 4.30% de carbono.
3. Un peritéctico a 1 493°C y 0.53 % de carbono.

La reacción eutectoide es de particular interés y se puede escribir como:

$$\gamma(0.76\%\ C) \rightarrow \alpha(0.022\%\ C) + Fe_3C(6.67\%\ C).$$

El acero al carbono se clasifica con base en qué lado de la concentración euctectoide (0.76%) se encuentra su concentración de carbono. Al acero con carbono exactamente a 0.76 wt% se le llama *acero eutectoide*. Con menos de 0.76 wt%C se le llama ***acero hipoeutectoide***, mientras que con más de 0.76 wt% se le llama ***acero hipereutectoide***.

Cuando el acero eutectoide se calienta a temperaturas mayores de los 727°C durante suficiente tiempo, el material se transforma en austenita pura (γ), mostrado en la figura 4-14, a través de un proceso llamado ***austenización***. La transformación de perlita a austenita requiere de una significativa reorganización de la red cristalina del hierro desde una estructura BCC a una estructura FCC.

Cuando la austenita se enfría, el diagrama de fase en la figura 4-12 indica que la perlita se debe formar. Esta transformación requiere que la difusión afuera de la red cristalina de austenita FCC vuelva a la red cristalina ferrosa BCC. Si el enfriamiento entre los 727°C y 550°C sucede con una lentitud suficiente como para que ocurra la difusión, la perlita se forma. Sin embargo, cuando el enfriamiento sucede más rápido, se producen productos no equilibrados. Estos materiales tienen importancia comercial relevante pero no aparecen en un diagrama de fase de equilibrio. La tabla 4-4 resume los productos no equilibrados más importantes.

Si la austenita se templa rápidamente a temperaturas cercanas a la temperatura ambiente al sumergir el metal en agua fría, ocurre una transformación sin difusión a una fase de desequilibrio llamada ***martensita***. En esta ***transformación martensítica*** se forman celdas BCC alargadas, y todos los átomos de carbono permanecen como impurezas intersticiales en la red cristalina del hierro. La figura 4-15 muestra la microestructura de la martensita.

| *Acero hipoeuctectoide* |
Solución sólida de hierro-carbono con menos de 0.76 wt% de carbono.

| *Acero hipereuctectóide* |
Solución sólida de hierro-carbono con más de 0.76 wt% de carbono.

| *Austenización* |
Proceso a través del cual la red cristalina del hierro en acero se reorganiza de una estructura BCC a una estructura FCC.

| *Martensita* |
Producto no equilibrado del acero formado por la transformación sin difusión de la austenita.

| *Transformación martensítica* |
Conversión sin difusión de una forma de red cristalina a otra como resultado de un enfriamiento rápido.

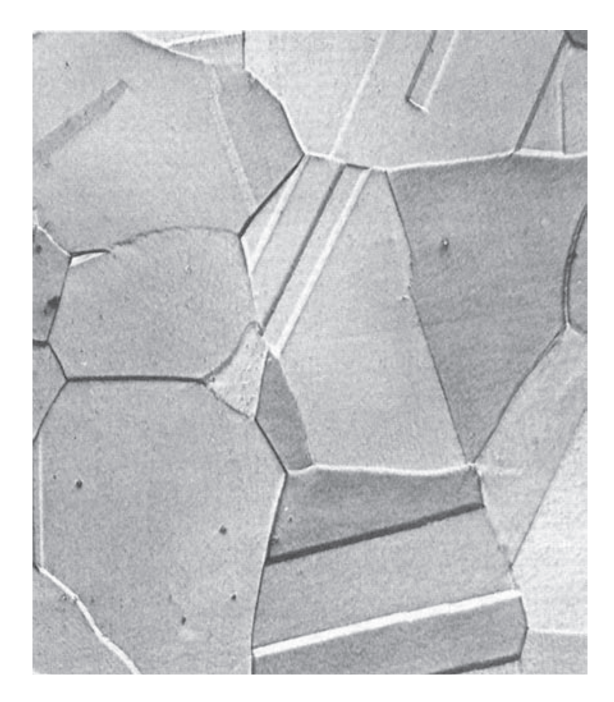


Figura 4-14 Microestructura de la austenita

La martensita es significativamente más dura y más fuerte que cualquier otro producto de acero al carbono, pero no es dúctil, aun a bajas concentraciones de carbono. La martensita no es una estructura estable y se convertirá en perlita si se calienta; sin embargo, a temperaturas ambiente puede durar por tiempo indefinido.

En la película *Conan el bárbaro*, Arnold Schwarzenegger calienta su espada en el fuego (aparentemente a temperaturas más altas que los 727° C durante el tiempo suficiente como para austenizar el acero), entonces de inmediato hunde la espada en la nieve. Aunque no parece ser que lo supiera, estaba llevando a cabo una transformación martensítica para mejorar la resistencia y dureza de su espada.

| ***Ensayo de templabilidad Jominy*** | Procedimiento utilizado para determinar la dureza de un material.

La transformación martensítica no es única para el acero y se refiere a cualquier transformación sin difusión en los metales. El ***ensayo de templabilidad Jominy*** se utiliza para determinar qué tanta composición de aleación impacta la capacidad del metal al ser sometido a una transformación martensítica a una temperatura de tratamiento específica. En el ensayo ilustrado en la

Tabla 4-4 Productos en desequilibrio del acero al carbono

Fase	*Microestructura*	*Conformado por*	*Propiedades mecánicas*
Martensita	Celdas tetragonales de cuerpo centrado con todos los carbonos como impurezas intersticiales	Templado rápido de la austenita a temperatura ambiente	Más dura y más fuerte pero difícil de maquinar; muy baja ductilidad.
Bainita	Partículas alargadas de cementita aciculares en una matriz de ferrita α	Templado de la austenita entre 550°C y 250°C y mantenerla a esa temperatura	Segunda en dureza y resistencia que la martensita pero más dúctil y más fácil de maquinar.
Esferoidita	Esferas de cementita en una matriz de ferrita α	Calentar bainita o perlita de 18 a 24 horas cerca de los 700°C	Menos dura y fuerte que los productos no equilibrados pero más dúctil y fácil de maquinar.
Perlita gruesa	Capas gruesas alternantes de cementita y ferrita α	Tratamiento isotérmico justo por debajo de la temperatura eutectoide	La menos fuerte y dura a excepción de la esferoidita; la segunda a la esferoidita en ductilidad.
Perlita fina	Capas delgadas de cementita y ferrita α	Tratamiento calórico a temperaturas más bajas	Entre la bainita y la perlita gruesa en resistencia y en ductilidad.



Figura 4-15 Microestructura de la martensita

Figura 4-16 Ensayo de templabilidad Jominy.

figura 4-16, una barra cilíndrica de 1 pulgada de diámetro con 4 pulgadas de largo es austenizada y luego montada rápidamente en un accesorio. Un extremo de la muestra cilíndrica se templa mediante un rocío de agua fría. El área rápidamente templada se somete a la transformación martensítica y se vuelve más dura. Una serie de ensayos de dureza se realizan para determinar qué tan lejos del punto de temple se extiende la dureza mejorada. A la profundidad de esta dureza mejorada desde el templado de un extremo de la muestra se le llama ***dureza*** del metal.

| *Dureza* | Capacidad de un material para someterse a una transformación martensítica.

Si la austenita rápidamente se templa a temperaturas entre los 550°C y 250°C, y se le permite permanecer a esa temperatura, otra estructura no equilibrada, llamada ***bainita***, se forma con las propiedades y microestructuras entre aquellas de la martensita y la perlita. La conversión de la austenita, ya sea a bainita o perlita, es competitiva. Una vez que se ha conformado, no puede ser transformada a la otra sin austenizar nuevamente el material.

| *Bainita* | Producto no equilibrado de acero con partículas de cementita alargadas en una matriz ferrosa.

La bainita es una matriz de ferrita con partículas de cementita alargadas. La microestructura muestra un patrón acicular distintivo debido a la cementita (figura 4-17). La bainita es más resistente y más dura que la perlita (aunque es menos resistente y menos dura que la martensita), pero permanece medianamente dúctil, en especial a bajas concentraciones de carbono.

Un tercer producto no equilibrado se puede formar al calentar la perlita o la bainita a temperaturas justo por debajo de la eutectoide (normalmente alrededor de los 700°C) durante 18 a 24 horas. El producto resultante, llamado ***esferoidita***, es menos duro y fuerte que la perlita pero es mucho más dúctil. La esferoidita obtiene su nombre de su microestructura en la cual las partículas de cementita se transforman, ya sea de las capas que se encuentran en la perlita, o de las agujas que se encuentran en la bainita, a esferas de cementita suspendidas en una matriz de ferrita α, como se muestra en la figura 4-18.

| *Esferoidita* | Producto no equilibrado de acero con esferas de cementita suspendidas en una matriz ferrosa.

Incluso la estructura de equilibrio de la perlita es afectada por las condiciones del proceso. La ***perlita gruesa***, que consta de capas gruesas alternantes de cementita y ferrita α, se forma cuando el acero es tratado isotérmicamente a temperaturas justo por debajo de la eutectoide. Cuando se usan tratamientos de temperaturas más bajas en su lugar, el rango de difusión se hace más lento y las placas alternantes se hacen más delgadas. A este producto se le llama ***perlita fina***. La perlita gruesa es un poco más dúctil que la perlita fina, pero menos dura.

| *Perlita gruesa* | Microestructura de acero con capas gruesas alternantes de cementita y ferrita α.

| *Perlita fina* | Microestructura de acero con capas delgadas alternantes de cementita y ferrita α.

Hasta aquí se ha comentado sobre el acero como si sólo contuviera carbono y hierro. En muchos casos, otros elementos de aleación se agregan para reforzar las soluciones sólidas, añadir resistencia a la corrosión o incrementar



Figura 4-17 Microestructura de la bainita

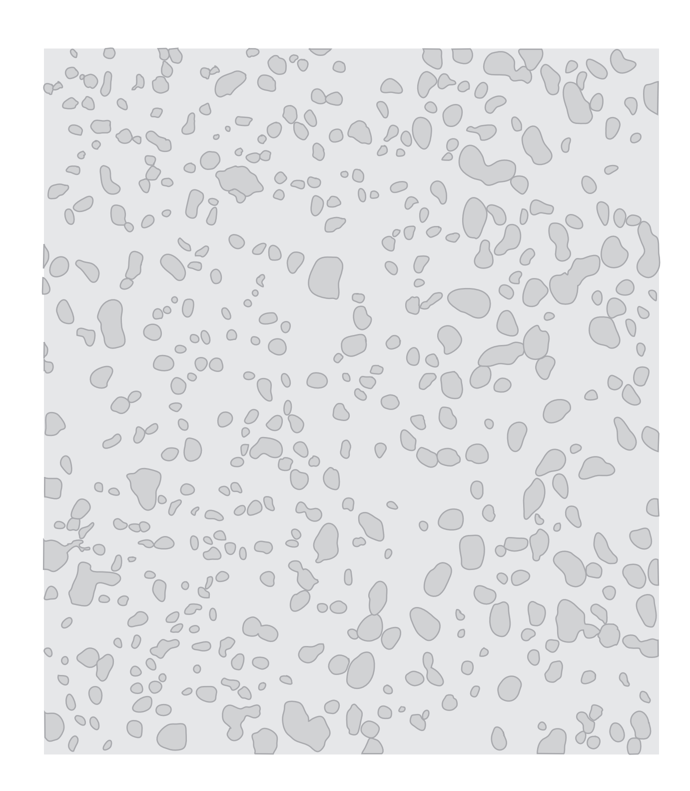
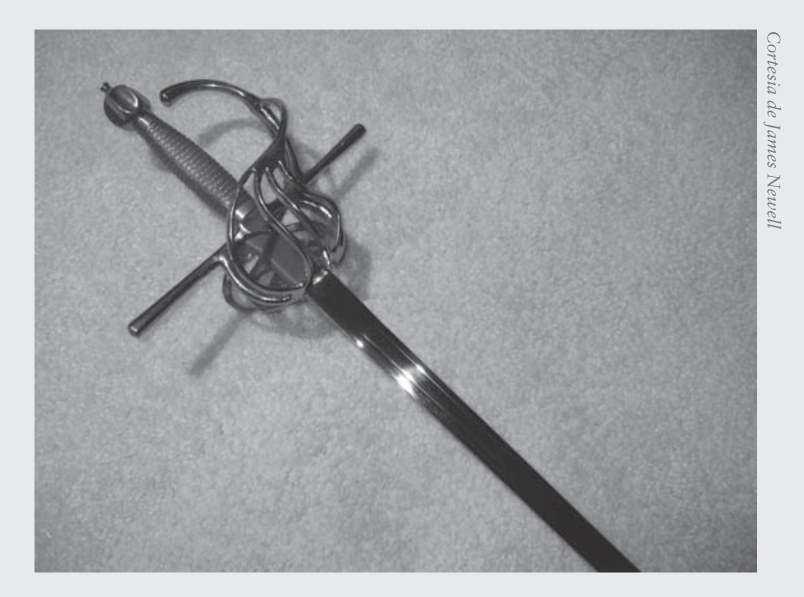


Figura 4-18 Microestructura de la esferoidita

Ejemplo 4-4

Dos caballeros (Sir Kevin y Sir Robert) deciden pelear en un duelo utilizando sus espadas más finas. Cada caballero lleva su espada de bainita con una concentración de carbono eutectoide al herrero local para que le saque filo. El herrero se da cuenta de que Sir Kevin es un sinvergüenza sin escrúpulos y decide hacer trampa a favor de Sir Robert. El herrero planea convertir una de las espadas a martensita y la otra a perlita gruesa, pero se da cuenta que su alteración será detectada si vuelve a fundir el metal. ¿Cómo podría el herrero convertir los materiales, y cuál caballero recibiría la espada de perlita y por qué?



Cortesía de James Newell

SOLUCIÓN

El herrero convertiría la espada de Sir Robert a martensita al calentarla por arriba de los 727°C durante el tiempo suficiente como para convertirla en austenita, entonces sumergería la espada en agua fría para templar la estructura sin permitir la difusión. Sir Robert obtendría la espada de martensita porque es más dura y menos dúctil. La espada de Sir Kevin sería convertida en perlita al calentarla por arriba de los 727°C durante el tiempo suficiente como para convertirla en austenita, y después dejándola enfriar con tratamientos isotérmicos por debajo de la temperatura eutectoide. Aún no se ha cubierto suficiente material como para determinar qué tanto tiempo llevarán estos tratamientos, pero ese tema se cubrirá más adelante en el capítulo.

la dureza del metal. Estos aceros se conocen como ***aceros aleados*** y pueden contener hasta 50% de elementos no ferrosos.

Los elementos de aleación más comunes son el cromo y el níquel. Cuando existe al menos 12% de cromo en la aleación, el metal se clasifica como ***acero***

| ***Aceros aleados*** |
Soluciones sólidas de hierro-carbono con elementos adicionales añadidos para cambiar sus propiedades.

| Acero inoxidable | Soluciones sólidas de hierro-carbono con por lo menos 12% de cromo.

inoxidable. Cuando se añade cromo al acero, la mayoría de éste se disuelve en la red cristalina de la ferrita mientras que el resto se une a la fase de carburo de la cementita. Los aceros inoxidables tienen un contenido bajo de carbono, así es que relativamente poco cromo forma carburos. El cromo estabiliza la red cristalina y esencialmente convierte el acero a una aleación binaria de hierro-cromo que permanece en su forma de ferrita α, la cual no se austeniza. Incluso a temperaturas elevadas, la red cristalina permanece en su forma BCC. La red cristalina resultante es más estable que el sistema típico de hierro-carbono. El cromo también oxida preferentemente al hierro, creando una barrera que protege al acero de mayor oxidación. A los aceros inoxidables que contienen cromo sin níquel se les llama ***aceros inoxidables ferríticos*** y son menos caros que aquellos que contienen níquel.

| Aceros inoxidables ferríticos | Soluciones sólidas de hierro-carbono con por lo menos 12% de cromo que no contiene níquel.

Cuando al acero fundido que contiene entre 0.15 y 1.0 por ciento de carbono se le añade 12 a 17 por ciento de cromo, ese acero es capaz de someterse a la transformación martensítica. Estos ***aceros inoxidables martensíticos*** son mucho más fuertes y duros que los aceros inoxidables ferríticos pero son menos resistentes a la corrosión.

| Aceros inoxidables martensíticos | Soluciones sólidas de hierro-carbono con por lo menos 12 a 17 por ciento de cromo que se pueden someter a la transformación martensítica.

El níquel es menos propenso a formar carburos que el hierro, por lo que permanece en la red cristalina del hierro cuando se añade al acero. El níquel tiene una estructura FCC, por lo que la adición de 7 a 20 por ciento de níquel al acero ayuda a la red cristalina a mantener la estructura FCC de la austenita aun cuando el acero se ha enfriado a temperatura ambiente. La estructura FCC hace al acero más maleable y altamente resistente a la corrosión. A estos aceros de contenido alto de níquel se les llama ***aceros inoxidables austeníticos*** porque retienen la estructura FCC de la austenita.

| Aceros inoxidables austeníticos | Soluciones sólidas de hierro-carbono con por lo menos 12% de cromo que contiene al menos 7% de níquel.

Para las aplicaciones que requieren mayor resistencia y dureza, los aceros de alto carbono (0.6 a 1.4 por ciento) son aleados con materiales que forman carburos. El cromo, el molibdeno, el tungsteno y el vanadio son elementos de aleación comunes. Debido a que estas aleaciones son duras, resisten el desgaste y mantienen un borde afilado, son especialmente útiles en aplicaciones industriales, incluyendo brocas, troqueles, sierras y otras herramientas. Como resultado, las aleaciones de acero de alto carbono son referidas comúnmente como ***aceros para herramientas***.

| Aceros para herramientas | Soluciones sólidas de hierro-carbono con alto contenido de carbono que resultan en la dureza incrementada y resistencia al desgaste.

Tabla 4-5 Designaciones AISI/SAE para aceros

Tipos	*Primer dígito*	*Segundo dígito*
Acero al carbono	Siempre 1	Describe el proceso
Acero al manganeso	Siempre 1	Siempre 3
Acero al níquel	Siempre 2	Porcentaje de níquel en el acero
Acero al níquel-cromo	Siempre 3	Porcentaje de níquel y cromo en el acero
Acero al molibdeno	Siempre 4	Porcentaje de molibdeno en el acero
Acero al cromo	Siempre 5	Porcentaje de cromo en el acero
Acero al cromo-vanadio	Siempre 6	Porcentaje de cromo y vanadio en el acero
Acero al tungsteno-cromo	Siempre 7	Porcentaje de tungsteno y cromo en el acero
Acero al silicio-manganeso	Siempre 9	Porcentaje de silicio y manganeso en el acero
Acero de triple aleación (contiene tres aleaciones)	Ya sea 4, 8 o 9	Porcentaje que queda de dos aleaciones en el acero

Ejemplo 4-5

Identificar las composiciones de aceros 1095 y 5160.

SOLUCIÓN

1095 es un acero al carbono (1) sin procesamiento especial (0) que contiene 0.95% de carbono (95). 5160 es un acero al cromo (5), con aproximadamente 1% de cromo (1) y 0.60% de carbono.

Debido a que los aceros pueden contener diferentes cantidades de carbono junto con cualquier número de distintos elementos de aleación, el American Iron and Steel Institute (AISI) desarrolló un sistema de clasificación para identificar eficientemente la composición del metal. El sistema AISI/SAE, resumido en la tabla 4-5, proporciona una referencia sencilla para determinar el contenido de carbono del acero y las identidades de los elementos de aleación primarios. A la aleación de acero se le asigna un número de identificación de cuatro dígitos. El primer número identifica los elementos de aleación primarios. El acero al carbono comienza con 1, el acero al níquel con 2 y así sucesivamente. El segundo dígito describe las condiciones de proceso en el caso del acero al carbono o la cantidad del elemento de aleación primaria en el acero. Los dígitos tercero y cuarto representan el porcentaje de carbono en el acero por 100. Debido a que la mayoría de los aceros contienen menos de 1% de carbono, el primer cero se omite. Por ejemplo, 1040 (en lugar de 10040) describe un acero al carbono básico con 0.4% de carbono; 6150 representa un acero al cromo-vanadio con 1% de cromo y/o vanadio y 0.5% de carbono.

4.4 TRANSICIONES DE FASE

Todas las transiciones térmicas descritas en este capítulo se conducen mediante la termodinámica pero requieren tiempo. Durante las etapas tempranas de una transición de fase, los pequeños núcleos de la nueva fase se deben formar y permanecer estables lo suficiente como para empezar a crecer. Mientras los granos de la nueva frase comienzan a crecer desde estos núcleos, cantidades crecientes de la fase original o madre se consumen. La cantidad de transformación se puede medir directamente con microscopía o indirectamente por una propiedad que está influenciada por el cambio de fase. La *ecuación de Avrami*,

$$y = 1 - \exp(-kt^n), \tag{4.10}$$

se utiliza para evaluar la fracción convertida (y) a la nueva fase como una función de tiempo (t). Las constantes k y n varían con el tipo de material y la temperatura. Debido a que las transformaciones de fase son procesos relacionados con la difusión, el rango de transformación (r) varía con la temperatura y generalmente sigue la ecuación de Arrhenius,

$$r = Q_0\, exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right), \tag{4.11}$$

en donde Q_0 es una constante específica del material, E_A es la energía de activación, R es la constante del gas y T es la temperatura.

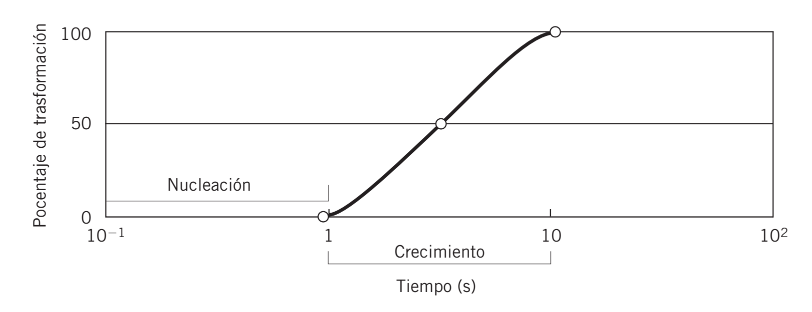


Figura 4-19 Porcentaje de transformación contra el registro (tiempo) para la conversión de austenita a perlita.

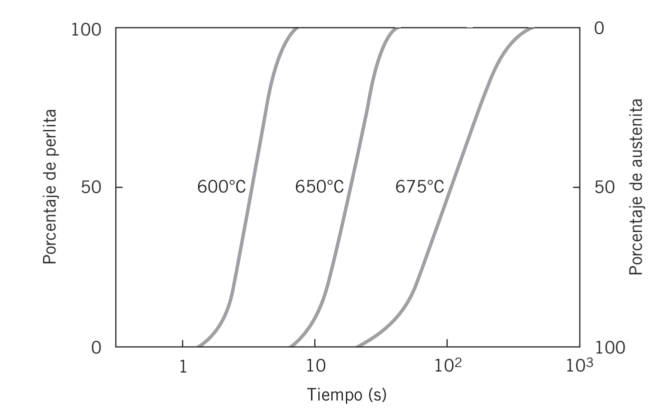


Figura 4-20 Porcentaje de transformación contra el registro (tiempo) para la conversión de austenita a perlita a varias temperaturas

De William D. Callister, Materials Science and Engineering, *6a ed. Reimpreso con la autorización de John Wiley & Sons, Inc.*

| ***Diagrama de transformación isotérmica*** | Figura utilizada para resumir el tiempo necesario para completar una transformación de fase específica como una función de temperatura para un material dado.

| ***Curva de inicio*** | Línea en un diagrama de transformación isotérmica que representa el momento antes de que comience la fase de transformación.

| ***Curva de finalización al 50%*** | Línea en un diagrama de transformación isotérmica que indica cuándo se ha completado la mitad de la fase de transformación.

| ***Curva de finalización*** | Línea en un diagrama de transformación isotérmica que indica cuándo se ha completado la fase de transformación.

Para la mayoría de los metales se puede construir una curva que compara la conversión fraccional con el logaritmo del tiempo transcurrido, muy semejante a la de la figura 4-19. El trazo también indica el tiempo gastado principalmente en la nucleación (en donde la pendiente de la línea es pequeña) y el principio del crecimiento del grano (en donde la pendiente se incrementa claramente). Desafortunadamente, cada trazo corresponde al rango de conversión a sólo una temperatura. Se requeriría una serie de curvas, como las que se muestran en la figura 4-20, para caracterizar totalmente la conversión a diferentes temperaturas.

Aunque estos trazos contienen cantidades significativas de información, son voluminosas para su uso en la práctica ya que se requiere un trazo diferente para cada temperatura. En su lugar, la información de muchos trazos se combina en un ***diagrama de transformación isotérmica***, más comúnmente llamado *diagrama T-T-T* (transformación tiempo-temperatura), como el que se muestra en la figura 4-21. El diagrama consta de tres curvas. La primera representa 0% de conversión y se llama ***curva de inicio***. La línea punteada en el centro, la ***curva de finalización al 50%***, identifica cuánto tiempo se requiere para que la transformación alcance el punto medio. Finalmente, la ***curva de finalización*** indica cuánto tiempo se requiere para la conversión total.

Los diagramas de transformación isotérmica son herramientas excepcionalmente valiosas pero tienen sus limitaciones. Cada trazo corresponde a una sola concentración. En el caso de la figura 4-21, la gráfica aplica sólo a la concentración eutectoide. Los diagramas también aplican sólo para las transformaciones isotérmicas, en las que el metal se mantiene a una temperatura constante a través de toda la fase de transición.

La figura 4-21 también contiene tres isotérmicos marcados como *M* (inicio), *M* (50%) y *M* (90%). Estas líneas representan las temperaturas a las que

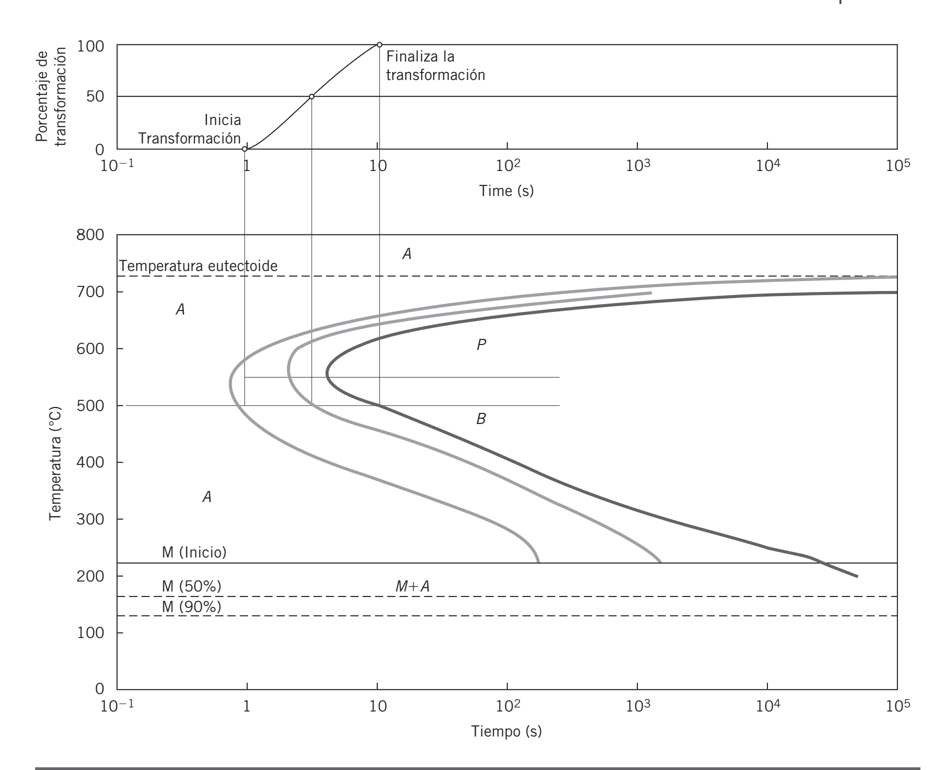


Figura 4-21 Diagrama de transformación isotérmica para la austenita en conversión a perlita en la concentración eutectoide

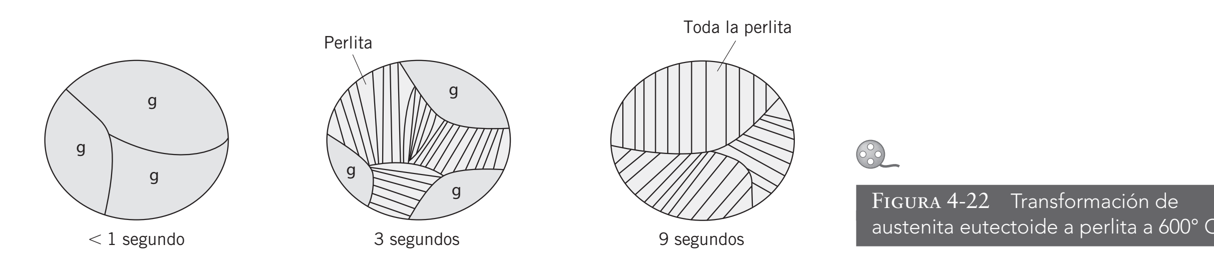


Figura 4-22 Transformación de austenita eutectoide a perlita a 600° C

la martensita se comienza a formar (M [Inicio]), a la que 50% de la austenita se habrá convertido en martensita (M [50%]) y a la que 90% de la austenita se habrá convertido a martensita (M [90%]).

La figura 4-22 muestra lo que le sucede a la microestructura durante el proceso de la transición isotérmica. Arriba de los 727°C, la microestructura total consistiría de granos de austenita. Estos granos estarían estables y no comenzarían a transformarse. Si la muestra se enfriara rápidamente a 600°C, los granos de la austenita ya no estarían estables. La termodinámica favorecería su conversión a ferrita y cementita (perlita en equilibrio), pero se requiere tiempo para que esto suceda. Durante los primeros 2 a 3 segundos se forman espontáneamente pequeños núcleos de perlita que empiezan a crecer, consumiendo a la fase madre (austenita) en el proceso. Alrededor de los 6 segundos, la transformación se ha completado en 50%, y la microestructura ahora consiste de granos de austenita que se encogen rodeados de granos crecientes de perlita. Finalmente, a los 9 segundos, la muestra entera se ha convertido en perlita.

Los diagramas de transformación isotérmica proporcionan considerable entendimiento sobre las transformaciones de fases que ocurren en los metales,

Ejemplo 4-6

¿Durante cuánto tiempo el herrero del ejemplo 4-4 necesita mantener la espada de Sir Kevin a 650°C para convertirla completamente en perlita?

SOLUCIÓN

La figura 4-21 muestra que lleva alrededor de 90 segundos alcanzar el 100% de la curva de finalización a 650°C.

Ejemplo 4-7

Para un acero eutectoide inicialmente a 750°C, determine la microestructura resultante presente si el acero se:

a. Sumerge en agua fría.
b. Enfría rápidamente a 650°C y luego se mantiene a temperatura durante 30 segundos.
c. Enfría rápidamente a 680°C y luego se mantiene a temperatura durante 10 segundos.
d. Enfría rápidamente a 680°C y luego se mantiene a temperatura durante 1 hora.
e. Enfría rápidamente a 680°C y luego se mantiene a temperatura durante 16 horas.
f. Enfría rápidamente a 500°C y luego se mantiene a temperatura durante 2 minutos.

SOLUCIÓN

a. El material se templaría antes de que cualquier difusión pudiera tener lugar, así es que la microestructura resultante sería martensita.
b. El material estaría cerca de la línea de finalización a 50%, así es que sería una mezcla aproximadamente igual de granos inestables de austenita y granos crecientes de perlita.
c. Diez segundos es previo a la curva de inicio a 680° C, así es que el material aun sería todo austenita.
d. A 1 hora, el material sería una mezcla de austenita y perlita gruesa.
e. Dieciséis horas después de la curva de finalización, así es que todo el material sería perlita gruesa.
f. El material sería 100% bainita.

pero aplican únicamente a los metales que se mantienen a temperatura constante. En la mayoría de los procesos industriales, los materiales se enfrían continuamente con la temperatura disminuyendo a través del proceso. Como consecuencia, las microestructuras finales de la mayoría de los materiales son más complejas debido a que las transformaciones suceden sobre un amplio rango de temperaturas. En tales casos, el rango de enfriamiento es un factor

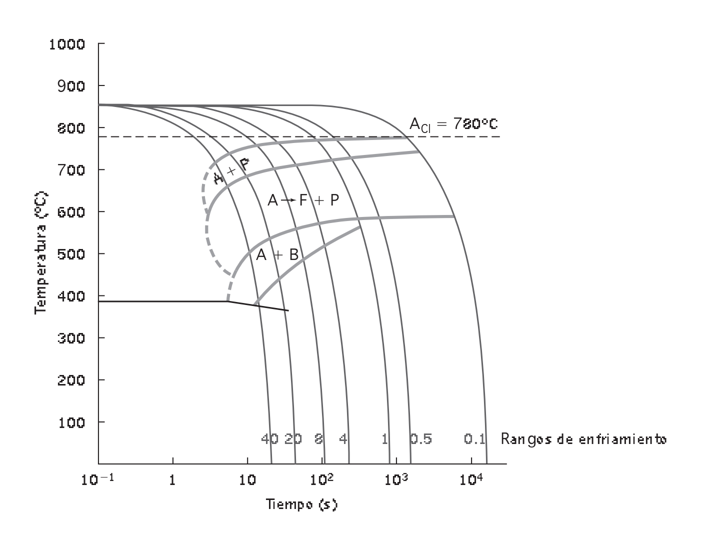


Figura 4-23 Diagrama de transformación por enfriamiento continuo para acero eutectoide

dominante para determinar la microestructura final. Es claro que si el acero eutectoide se enfría lo suficientemente rápido, formará martensita. En vez de esto, un rango de enfriamiento más lento resultaría en la formación de perlita. Un diagrama de transformación de enfriamiento continuo (CCT), como el que se muestra en la figura 4-23, se utiliza para caracterizar la transformación.

El diagrama de transformación por enfriamiento continuo es un trazo de temperatura contra tiempo con líneas curvas representando varios rangos de enfriamiento. El factor más importante en el trazo es la curva que representa el rango de enfriamiento crítico. A cualquier rango más lento que esta línea, la transformación de austenita a perlita comenzará. A cualquier rango más rápido, no hay tiempo suficiente para que suceda la difusión y el material se convertirá en martensita. Los isotérmicos M (Inicio), M (50%) y M (90%) suceden a exactamente las mismas temperaturas tal y como lo hicieron en los diagramas de transformación isotérmica. Al igual que con los diagramas de transformación isotérmica, se requerirán distintos diagramas CCT para cada composición de aleación.

4.5 ENDURECIMIENTO POR ENVEJECIMIENTO (ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACIÓN)

Mientras se consideran las transformaciones de fase asociadas con el enfriamiento y calentamiento de los metales, vale la pena comentar otros dos procesos utilizados para alterar las propiedades de las aleaciones. El ***endurecimiento por envejecimiento*** (o endurecimiento por precipitación) utiliza cambios en la solubilidad de las soluciones sólidas con temperatura para fomentar la precipitación de partículas finas de impurezas. Estas partículas refuerzan los metales maleables al servir como barreras a la propagación de dislocaciones a través de la matriz. Debido a que las partículas precipitadas suelen ser diferentes en tamaño que los átomos de metal que forman la red cristalina, éstas tienden a distorsionar la forma de la red cristalina.

El proceso de endurecimiento por envejecimiento sucede en dos etapas: ***tratamiento térmico de solución*** y ***tratamiento térmico de precipitación***. Durante el tratamiento térmico de solución el metal se calienta y se mantiene a una temperatura por arriba de la línea de solvus hasta que una fase se ha disuelto totalmente en

| ***Endurecimiento por envejecimiento*** |
Proceso que utiliza la dependencia a la temperatura de las solubilidades de las soluciones sólidas para fomentar la precipitación de partículas finas de las impurezas. También se le llama endurecimiento por precipitación.

| ***Tratamiento térmico de solución*** |
El primer paso en el endurecimiento por tiempo que involucra el calentamiento hasta que una fase se ha disuelto completamente en la otra.

| ***Tratamiento térmico de precipitación*** |
El segundo paso en el endurecimiento por tiempo en el que el rango de difusión se incrementa lo suficiente como para permitir que una fase forme un precipitado fino.

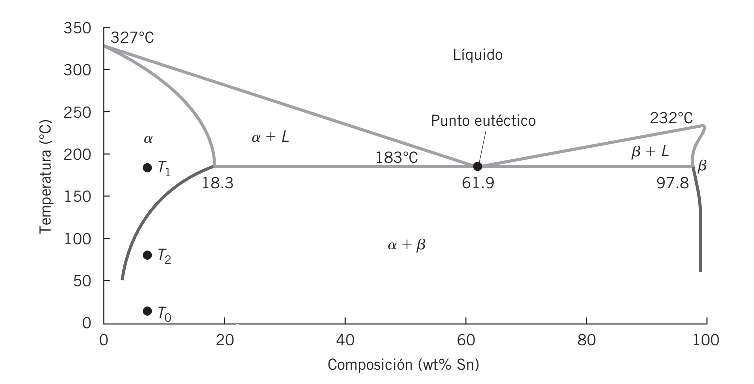


Figura 4-24 Gráfica del endurecimiento por envejecimiento

la otra (por ejemplo, calentar hasta el punto T_1 en la figura 4-24). La fase β se disuelve por completo en la fase α. La aleación se enfría rápidamente a una temperatura suficiente para evitar una difusión significativa (T_0 en la figura 4-24). Para muchas aleaciones esto es la temperatura ambiente. La aleación resultante contiene una solución sobresaturada de β disuelta en α.

En la segunda etapa, tratamiento térmico de precipitación, la temperatura de la aleación sobresaturada es incrementada a un nivel elevado pero aun por debajo de la línea de solvus (T_2 en la figura 4-24). A esta temperatura, el rango de difusión se incrementa lo suficiente como para permitir que la fase β se forme como un precipitado fino. El rango al que sucede la precipitación depende del rango de la difusión (que por sí mismo es una función de temperatura), la composición de la aleación y las solubilidades relativas de las fases α y β.

4.6 COBRE Y SUS ALEACIONES

| *Calcocita* |
Mineral de cobre más común.

| *Calcopirita* |
Mineral que contiene hierro comprendiendo alrededor del 25% de los minerales de cobre.

| *Cobre blister* |
Producto intermedio durante el refinamiento del cobre del cual se ha removido todo el hierro.

Los minerales de cobre se encuentran en muchas partes diferentes del mundo. Aproximadamente la mitad del suministro del mineral de cobre comercial está hecha de ***calcocita*** (Cu_2S) y con ***calcopirita*** ($CuFeS_2$) que suma 25% adicional. Un proceso pirometalúrgico de alta temperatura se utiliza para purificar y concentrar el cobre. El líquido resultante, llamado mata de cobre, se sopla con aire (muy parecido al acero) para oxidar el hierro en el sistema. Cuando la mayor parte del hierro se ha removido, el así llamado ***cobre blister*** se decanta y se transfiere a un horno de refinado para su procesamiento final.

El cobre puro tiene un color rojo distintivo y forma una pátina verde cuando se oxida, como se muestra en la figura 4-25. El cobre es uno de los pocos metales con usos comerciales significativos en una forma de no aleación. El cobre es altamente conductivo (el segundo sólo detrás de la plata pura entre los metales), resistente a la corrosión y moldeable, con densidad moderada (8.94 g/cm^3), haciéndolo deseable para su uso en alambres eléctricos y otras aplicaciones de construcción. Los utensilios de cocina de cobre están altamente cotizados debido a su excelente conducción térmica uniforme, pero el cobre puro puede volverse peligroso al contacto con la comida, así es que la mayoría de los utensilios de cocina de cobre comerciales están revestidos con acero inoxidable o estaño. La ingestión de cobre puede causar vómito y calambres; el consumo de tan solo 27 gramos puede causar la muerte. La exposición crónica casi siempre resulta en daños al hígado y crecimiento inhibido.

| *Cobres de baja aleación* |
Soluciones sólidas que contienen por lo menos 95% de cobre.

Frecuentemente pequeñas cantidades de otros metales se añaden al cobre para incrementar su resistencia o dureza. Estos ***cobres de baja aleación*** contienen al menos 95% de cobre y tratan de minimizar la pérdida de conductividad al mismo tiempo que mejoran las propiedades mecánicas. El cadmio es un

aditivo común en los cobres de baja aleación. La adición de 1% de cadmio aumentará significativamente la resistencia del metal mientras sacrifica sólo 5% de conductividad.

Aunque se utiliza con frecuencia como un metal puro con pequeñas cantidades de aditivos de metal, el cobre puede formar 82 aleaciones binarias. Dos de las más comunes son el ***latón*** (cobre-zinc) y el ***bronce*** (cobre-estaño). Los latones son fuertes, brillantes y más resistentes a la corrosión que el cobre puro. El diagrama de fase de cobre-zinc se muestra en la figura 4-26.

Por debajo de 35% de zinc, el metal existe como una sola fase, con átomos de zinc en una solución sólida con una red cristalina de cobre α. Los latones en este rango son fuertes y dúctiles y pueden ser fácilmente trabajados en frío. Al incrementar el contenido de zinc, se incrementa la resistencia del metal pero se reduce su resistencia a la corrosión.

Por arriba de 35% de zinc, domina una fase β BCC. Si el metal caliente se enfría rápidamente, la fase β permanece en su lugar a través de toda la estructura. A tasas más lentas de enfriamiento, la fase α se precipita hacia las fronteras de grano, lo que da por resultado granos β rodeados de precipitado α. Esta microestructura, mostrada en la figura 4-27, se llama ***estructura de Widmanstätten***, llamada así por el conde Alois von Beckh Widmanstätten, quien en 1908 descubrió la estructura en un meteorito.

El plomo (hasta 4%) se añade con frecuencia a los latones para aumentar la maquinabilidad y para llenar los espacios de poros en el metal. El plomo es esencialmente insoluble en el cobre y se precipita en las fronteras de grano. Como resultado, el plomo funge como lubricante durante el mecanizado.

Los latones son lustrosos, resistentes a la corrosión y fácilmente moldeables, haciéndolos ideales para figuras decorativas y adornos arquitectónicos. Las piezas fundidas de latón también encuentran su uso en instalaciones para plomería, válvulas de baja presión, cojinetes y engranajes.

Las aleaciones de bronce aparecieron por primera vez en la antigua Sumeria alrededor de 3500 a.C. El bronce es más duro que la mayoría de las aleaciones comerciales, resistente a la corrosión y fácilmente maleable. Aunque el término ***bronce*** se ha vuelto un genérico para muchas aleaciones de cobre duras que se asemejan al bronce, éste se originó con los sistemas de cobre-estaño. La mayoría de los bronces comerciales contienen alrededor de 10% de estaño. Un diagrama de fase de cobre-estaño se muestra en la figura 4-28.

| ***Latón*** |
Aleación de cobre y zinc.

| ***Bronce*** |
Aleación de cobre y estaño.



Figura 4-25 Reconocible la pátina verde del cobre oxidado en la Estatua de la Libertad

PhotoDisc/Getty Images

| ***Estructura de Widmanstätten*** |
Microestructura presente en el latón en la que los granos de la fase α están rodeados por el precipitado de la fase β.

Figura 4-26 Diagrama de fase para el latón (cobre-zinc)

De T.B. Massalski, ed., Binary Alloy Phase Diagrams, 2a ed., *Vol. 3 ASM International, Materials Park, OH. Reimpreso con permiso de ASM Internacional.*



Figura 4-27 Estructura de Widmanstätten en el latón

El bronce encuentra su aplicación en las partes de motores, cojinetes, manufactura de campanas y esculturas artísticas. El bronce es especialmente adecuado para la fundición en moldes. Cuando el metal derretido se añade al molde, el metal se expande para llenar todo el volumen. Durante el enfriamiento, el metal se contrae ligeramente, haciendo fácil removerlo conservando la forma característica del molde.

Con frecuencia, los bronces incluyen otros elementos, añadidos en pequeñas cantidades, para mejorar propiedades específicas. La adición de 1 a 3 por ciento de silicio hace al bronce más duro para ser conformado pero mejora significativamente su resistencia a agentes químicos. Los bronces de silicio son comúnmente utilizados en contenedores químicos. Usualmente, al bronce se le añade hasta 10% de plomo para suavizarlo, haciéndolo más fácil de conformar y aumentando su capacidad de sostener un borde cortante. Estos ***bronces de plomo*** se utilizan en general en los moldeos artísticos pero son menos fuertes y más frágiles que el bronce normal y son menos útiles para herramientas. Es común que al bronce

| ***Bronces de plomo*** |
Aleaciones de cobre-estaño que también contienen hasta 10% de plomo que se añade para suavizar el metal.

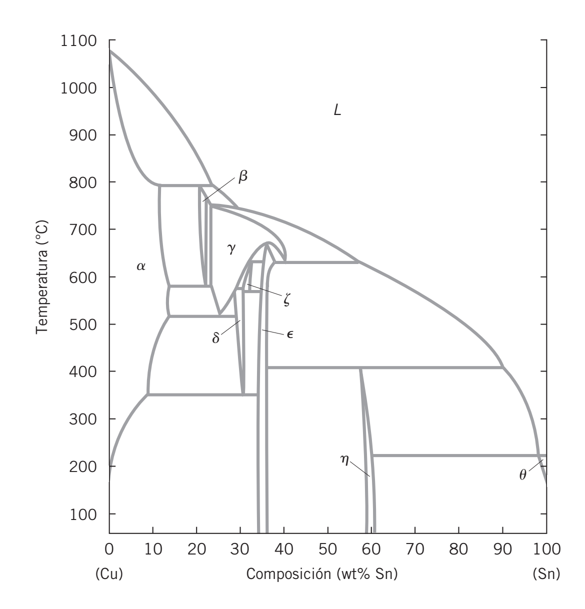


Figura 4-28 Diagrama de fase del cobre-estaño

De R. Hultgren y P.D. Desai, Selected Thermodynamic Values and Phase Diagrams for Copper and Some of its Binary Alloys, Incra Monograph I *(Nueva York: International Copper Research Association, Inc., 1971). Reimpreso con permiso de la International Copper Research Association.*

utilizado para herramientas se le añada antimonio debido a que endurece el material y mejora su capacidad para sostener un borde cortante.

4.7 ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

El aluminio es el elemento metálico más común en la corteza terrestre y tiene una densidad (2.70 g/cm^3) de aproximadamente un tercio de la del acero. Como resultado, la proporción resistencia a la tracción-peso del aluminio es excepcional. El aluminio tiene una fuerte afinidad con el oxígeno y casi siempre se encuentra como óxidos o silicatos en vez de su forma nativa. Casi todo el aluminio comercial se produce de la ***bauxita***, que es una clase de mineral rico en óxidos de aluminio. La bauxita se debe tratar para remover impurezas y silicatos antes de poder convertirla a aluminio metálico.

| *Bauxita* |
Clase de minerales ricos en óxidos de aluminio que fungen como el mineral principal para la producción de aluminio.

El aluminio se usa ampliamente en aplicaciones aeroespaciales, automóviles, latas de bebidas y otros empaques. Por su alta ductilidad, el aluminio puede ser laminado en láminas extremadamente delgadas. El aluminio forma una red cristalina FCC y comúnmente se alea con magnesio, cobre, litio, silicio, estaño, manganeso y/o zinc.

Las aleaciones de aluminio son ampliamente clasificadas como de ***forja*** o ***fundidas***. Las aleaciones de forja se identifican mediante un número único de cuatro dígitos. El primer dígito representa el elemento de aleación primaria, el segundo muestra las modificaciones, y el tercero y el cuarto muestran el porcentaje decimal de la concentración de aluminio. Las principales clases se resumen en la tabla 4-6. Las aleaciones fundidas se distinguen de las aleaciones de forja por la presencia de un punto decimal entre el tercer y cuarto dígitos.

| *Forja* |
Conformado por deformación plástica.

| *Fundida* |
Reformado al ser derretido y vertido en un molde.

Tabla 4-6 Nomenclatura de las aleaciones de aluminio

Designación	*Elementos aleados*	*Propósito del elemento aleado*
Forja		
1xxx	(>99% aluminio)	Ninguna
2xxx	Cobre	Resistencia y maquinabilidad
3xxx	Manganeso	Resistencia a la corrosión y maquinabilidad
4xxx	Silicio o silicio y magnesio	Disminución del rango de derretimiento
5xxx	Magnesio	Dureza y resistencia a la corrosión
6xxx	Magnesio y silicio	Tratable térmicamente y conformabilidad
7xxx	Magnesio y zinc	Resistencia a la corrosión bajo tensiones
8xxx	Litio, estaño, circonio o boro	
Fundición		
1xx.x	(>99% aluminio)	
2xx.x	Cobre	
3xx.x	Silicio y cobre o magnesio y cobre	
4xx.x	Silicio	
5xx.x	Magnesio	
7xx.x	Magnesio y zinc	
8xx.x	Estaño	

| ***Designación de temple*** |
Nomenclatura que muestra si una aleación de aluminio fue endurecida por deformación o térmicamente tratada.

Con frecuencia, las aleaciones de aluminio son reforzadas a través de una variedad de técnicas de trabajo en frío que incrementan la resistencia mecánica pero reducen la resistencia a la corrosión. Debido a que el reforzamiento es muy común, la mayoría de las aleaciones de aluminio tienen una ***designación de***

Tabla 4-7 Designaciones de temple para las aleaciones de aluminio

Símbolo	*Significado*
F	Como se fabricó
O	Recocida
H1x	Trabajada en frío con la x indicando la cantidad de trabajo en frío
H2x	Trabajada en frío y luego parcialmente recocida
H3x	Trabajada en frío y luego estabilizada a baja temperatura para prevenir el endurecimiento por edad
W	Tratada por solución
Tx	Endurecida por edad con la x proporcionando detalles adicionales sobre las condiciones del proceso

Ejemplo 4-8

Para las siguientes aleaciones de aluminio, determine el principal elemento de aleación, si la aleación es fundida o de forja, y si ha sido tratada térmicamente, endurecida por deformación o ninguna.

1199.*H*18 *A*380.0 4043

SOLUCIÓN

1199 es una aleación de forja (no hay punto decimal después del tercer dígito) con más de 99% de aluminio (el primer dígito es 1). Ha sido endurecida por deformación por un factor de 8 pero no ha sido recocida (de H18).

A380.0 es una aleación fundida (punto decimal después del tercer dígito) con manganeso como su principal elemento de aleación (comienza con 3). Y no ha sido ni endurecida por deformación ni tratada térmicamente (sin designación de temple).

4043 es una aleación de forja con silicio (o silicio y manganeso) como su principal elemento de aleación. No ha sido ni endurecida por deformación ni térmicamente tratada.

Ejemplo 4-9

¿Cuál de las aleaciones en el ejemplo 4-8 serviría mejor para su uso en soldadura y por qué?

SOLUCIÓN

La 4043 sería la más útil en soldadura debido a que el silicio reduce el rango de derretimiento de la aleación.

temple suplementaria que indica si el material fue endurecido por deformación (H) o por tratamiento térmico (T), también conocido como endurecimiento por edad. La tabla 4-7 resume las designaciones de temple para las aleaciones de aluminio.

¿Qué limitaciones tienen los metales?

4.8 CORROSIÓN

El deterioro de los metales en el medio ambiente le cuesta a las empresas miles de millones de dólares al año. Los electrones libres que dan a los metales su excepcional conductividad, también los hacen particularmente susceptibles al ataque químico. A esta pérdida de material debida a una reacción química con el medio ambiente se le llama ***corrosión***. Para entender completamente la corrosión, primero es necesario revisar la ***electroquímica***. Durante la corrosión, los metales transfieren electrones a otro material a través de un proceso llamado ***oxidación***. La reacción de oxidación sucede en un sitio llamado ***ánodo*** y se puede representar como



| *Corrosión* | Pérdida de material debido a una reacción química con el medio ambiente.

| *Electroquímica* | Rama de la química que tiene que ver con la transferencia de electrones entre un electrolito y un conductor de electrón.

| *Oxidación* | Reacción química en la que un metal transfiere electrones a otro material.

| *Ánodo* | Sitio en el que ocurre la oxidación en una reacción electroquímica.

| *Reducción* | Reacción química en la que un material recibe electrones transferidos de un metal.

| *Cátodo* | Sitio en el que ocurre la reducción en una reacción electroquímica.

$$\text{Metal} \rightarrow \text{Metal ion}^{(n+)} + \textit{eletrones n perdidos}. \quad (4.12)$$

Otras especies recogen los electrones perdidos a través de un proceso llamado ***reducción***, el cual se lleva a cabo en el ***cátodo***. El material que gana los electrones puede ser cualquiera capaz de recibir electrones, pero más comúnmente es un ácido u otro ión de metal. La reacción de reducción se puede representar como

$$\text{Metal ion}^{(n+)} + \textit{eletrones n perdidos} \rightarrow \text{Metal}. \quad (4.13)$$

Debido a que el número total de electrones no puede cambiar, las reacciones de oxidación y reducción suceden simultáneamente. Un ejemplo específico sería sumergir magnesio (Mg) en una solución ácida fuerte. La reacción de oxidación,

$$Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2\,e^-, \quad (4.14)$$

representaría la oxidación del magnesio, mientras que la reducción de los iones de hidrógeno del ácido se darían mediante

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2. \quad (4.15)$$

La reacción de corrosión electroquímica más famosa es la herrumbre del hierro. Cuando el hierro metálico (Fe) es expuesto a agua con oxígeno disuelto, sucede una reacción de dos pasos. En la primera etapa, el hierro se oxida, como se muestra en la ecuación 4.16:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-. \quad (4.16)$$

Esta vez, los iones de hierro reaccionan rápidamente para formar $Fe(OH)_2$,

$$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2. \quad (4.17)$$

En la segunda etapa de la reacción, el hierro nuevamente se oxida,

$$Fe(OH)_2 \rightarrow Fe(OH)_2{}^+ + e^-. \quad (4.18)$$

| Herrumbre |
Producto final de la corrosión electroquímica del hierro.

El ión positivo nuevamente reacciona con un ión de hidróxido del agua para formar un compuesto insoluble, $Fe(OH)_3$, el cual es mejor conocido como ***herrumbre.***

$$Fe(OH)_2{}^+ + OH^- \rightarrow Fe(OH)_3. \quad (4.19)$$

| Celda electroquímica |
Dispositivo diseñado para crear voltaje y corriente a partir de las reacciones químicas.

Los ejemplos previos involucraron a un metal como el donador de electrones y a los iones de hidrógeno como los receptores de electrones. Sin embargo, los metales pueden también intercambiar electrones con otros metales. El concepto está claramente ilustrado por el tipo de celda electroquímica mostrada en la figura 4.29. En una ***celda electroquímica*** dos soluciones se separan mediante una barrera impermeable. En un lado de la barrera se coloca una pieza de cobre en una solución que contiene iones de cobre (Cu^{2+}). En el otro lado, una pieza de estaño se coloca en una solución que contiene iones de estaño (Sn^{2+}). Si las dos piezas de metal se conectan por un alambre, los electrones fluirán del estaño al cobre. Un voltímetro colocado en el alambre debería mostrar una diferencia de potencial de 0.476 voltios. Durante el proceso, el estaño metálico se oxidaría, generando más iones de estaño (Sn^{2+}) mientras que los electrones fluirían hacia la solución de iones de cobre y reducirían los iones de cobre (Cu^{2+}) a cobre metálico, lo que causaría que el estaño cubriera la superficie de la pieza de cobre. La reacción neta está dada por

$$Cu^{2+} + Sn \rightarrow Cu + Sn^{2+}. \quad (4.20)$$

| Galvanoplastía |
Deposición electroquímica de una capa delgada de metal en una superficie conductiva.

El cobre fungió como el ánodo y ganó metal mientras que el estaño fungió como cátodo y se corroyó. El proceso, llamado ***galvanoplastía,*** se utiliza para poner capas delgadas de oro, plata o cobre en vajillas pero también tiene implicaciones significativas en la corrosión.

| Serie galvánica |
Lista que ordena los metales según su tendencia a oxidarse cuando se conectan con otros metales en soluciones con sus iones.

La ***serie galvánica***, mostrada en la tabla 4-8, califica a distintos metales de acuerdo al orden de su tendencia a oxidarse cuando se conectan con otros metales en soluciones con sus iones. Esta tabla proporciona información crucial sobre cuál metal fungirá como el ánodo y cual como el cátodo.

| Pasivación |
Formación espontánea de una barrera protectora que inhibe la difusión del oxígeno y la corrosión.

La serie galvánica distingue entre las formas pasivas y activas de algunas aleaciones, incluyendo el acero inoxidable. Las aleaciones pasivas se vuelven menos anódicas debido a la formación de una barrera de óxido delgada en la superficie del metal que proporciona un obstáculo para la difusión del oxígeno e inhibe la corrosión adicional. A la formación espontánea de esta barrera protectora se le llama ***pasivación.***

Por lo menos ocho formas distintas de corrosión metálica pueden suceder. Todas son impactadas por las condiciones ambientales, incluyendo la temperatura, la inmersión en líquidos, la acidez y la velocidad de fluidos. Más de una forma de corrosión puede ocurrir de forma simultánea.

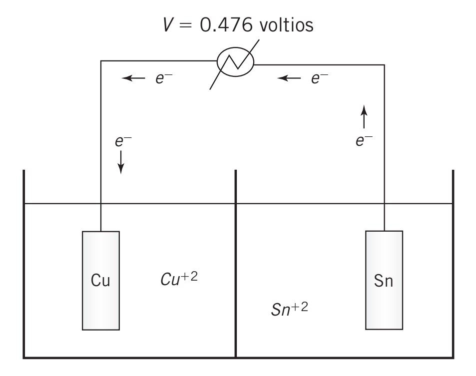


Figura 4-29 Celda electroquímica con cobre y estaño

Tabla 4-8 Serie galvánica

Más catódico (menos propenso a oxidarse)	Platino
	Oro
	Grafito
	Titanio
	Plata
	Acero inoxidable pasivo
	Níquel pasivo
	Monel
	Aleaciones de cobre-níquel
	Bronces
	Cobre
	Latones
	Níquel activo
	Estaño
	Plomo
	Acero inoxidable activo
	Hierro fundido
	Hierro y aceros
	Aleaciones de aluminio
	Cadmio
	Aluminio
	Zinc
Más anódico (más propenso a oxidarse)	Magnesio y aleaciones de magnesio

El ***ataque uniforme*** es la forma más común de corrosión y es la más fácil de diseñar. Durante el ataque uniforme la superficie metálica en su totalidad es atacada electroquímicamente de una manera uniforme, y con frecuencia se desprende un residuo. Las capas protectoras se utilizan a menudo para proteger la superficie metálica al hacer contacto con el ambiente corrosivo.

La ***corrosión galvánica*** opera de manera muy similar a la celda electroquímica antes comentada. Cuando los metales no similares se conectan electrónicamente, las diferencias en sus potenciales electroquímicos los llevarán a la corrosión. El metal que está más abajo en la serie galvánica se oxidará a favor del metal más catódico. Cuando el cobre y las tuberías de acero se juntan en los calentadores de agua caseros, por ejemplo, primero se corroe el acero. Hay diversas estrategias para minimizar la corrosión galvánica, incluyendo la selección de metales que se encuentren cerca el uno del otro en la serie galvánica, y prevenir que los metales no similares hagan contacto eléctrico uno con el otro. Sin embargo, algunas veces la corrosión galvánica se puede utilizar como ventaja. Los cascos de acero de los barcos se corroerán en el agua de mar. Sin embargo, pequeñas piezas de zinc se adjuntan rutinariamente a los cascos. El zinc se corroe preferentemente y transfiere electrones al hierro en el casco, protegiéndolo del ataque electroquímico. El zinc sirve como un ***ánodo de sacrificio*** y proporciona ***protección catódica*** al hierro.

| ***Ataque uniforme*** |
Tipo de corrosión en la que la superficie total del metal está afectada.

| ***Corrosión galvánica*** |
Pérdida de material resultante del metal que se encuentra más abajo en la serie galvánica oxidándose a favor del metal más catódico.

| ***Ánodo de sacrificio*** |
Un metal bajo en la serie galvánica utilizado para oxidar y transferir electrones a un metal más importante.

| ***Protección catódica*** |
Forma de resistencia a la corrosión proporcionada por el uso de un ánodo de sacrificio.

| *Picaduras* |
Forma de corrosión que resulta del material corrosivo juntado en los pequeños defectos de la superficie.

| *Corrosión por grietas* |
Pérdida de material resultante de la captura de soluciones estancadas contra el metal.

| *Corrosión intergranular* |
Pérdida de material resultante de la captura de soluciones estancadas contra el metal

| *Sensibilizados* |
Hechos más susceptibles a la corrosión intergranular por la disminución localizada de un elemento precipitado en la región de una frontera de grano.

| *Corrosión bajo tensión* |
Pérdida de material resultante de la influencia combinada de un ambiente corrosivo y una resistencia a la tracción aplicados.

Cuando en la superficie de un metal existen pequeños defectos, incluyendo pequeños hoyos o raspaduras, los materiales corrosivos tienden a juntarse en esas áreas. El material corrosivo en el hoyo oxida el metal, creando una picadura aun más profunda, corroyendo y finalmente perforando el metal completo. Este proceso, llamado ***picaduras,*** frecuentemente es difícil de detectar porque la mayoría de la superficie del metal no está afectada. La presencia de cloruros (como aquellos encontrados en el agua salina) empeora el proceso de picaduras al hacerlas levemente ácidas y al autocatalizar la reacción de corrosión. Las picaduras son en extremo difíciles de prevenir totalmente pero se pueden reducir al pulir la superficie del metal para eliminar los defectos de superficie o al utilizar un acero inoxidable con por lo menos 2% de molibdeno.

La corrosión por grietas es muy similar a la de picaduras y sucede en cualquier lugar en que puedan permanecer soluciones estancadas. Es más seria cuando sucede bajo pernos, remaches y juntas. Aun las aleaciones pasivas están sujetas a la corrosión por grietas debido a que la acumulación de iones de hidrógeno en las capas estancadas erosionan las barreras protectoras. La corrosión por grietas se puede reducir usando soldaduras en vez de remaches para conectar los metales, asegurando el drenaje total para reducir la probabilidad de formar capas estancadas, usando juntas de Teflón ® que no absorberán líquidos y removiendo el polvo y otros depósitos que fomentan la formación de líquidos estancados.

La ***corrosión intergranular,*** ilustrada en la figura 4-30, sucede preferentemente en las fronteras de grano. En algunos casos, el material en las fronteras de grano se hace más susceptible a la corrosión que el resto del metal. Este ataque preferencial puede resultar en fallas macroscópicas. Los materiales con frases precipitadas en las fronteras de grano son particularmente susceptibles a la corrosión intergranular. Los aceros inoxidables y las soldaduras de acero inoxidable austeníticos son en particular susceptibles porque a temperaturas entre los 500°C y los 800°C, los carburos de cromo ($Cr_{23}C_6$) se precipitan hacia afuera de la red cristalina. Cuando el cromo se precipita fuera de la red cristalina, una región empobrecida en cromo se desarrolla cerca de la frontera de grano. En esta región empobrecida, las propiedades estabilizadoras de la red cristalina del cromo dejan de existir y la región cerca de la frontera de grano se hace particularmente susceptible al ataque corrosivo. El acero afectado de esta manera ha sido ***sensibilizado.*** La corrosión intergranular en los aceros inoxidables austeníticos puede ser minimizada al mantener el contenido de carbono bajo para reducir la formación de carburos o al alear el acero con otro metal (como el titanio) que tenga una mayor afinidad para formar carburos que la del cromo. En algunos casos, el cromo se puede recuperar del carburo al calentar el metal arriba de los 1000° C y templándolo rápidamente.

La ***corrosión bajo tensión*** resulta de la influencia combinada de un ambiente corrosivo y la aplicación de un esfuerzo de tracción. Durante la corrosión bajo tensión se forman grietas localizadas, como se muestran en la figura 4-31, y se propagan hasta que resulta la falla del material. Los materiales corroídos bajo tensión experimentan fallas frágiles aun cuando el metal por sí solo es generalmente dúctil. La corrosión bajo tensión es un fenómeno altamente específico del material. La mayoría de los materiales están sujetos a la corrosión

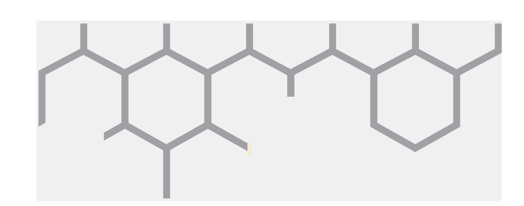


FIGURA 4-30 Esquema de la corrosión intergranular



Figura 4-31 Grietas localizadas formadas durante la corrosión bajo tensión

bajo tensión sólo cuando se exponen a materiales corrosivos muy específicos. Por ejemplo, el plomo es susceptible a la corrosión bajo tensión sólo cuando es expuesto a soluciones de acetato de plomo, mientras que los latones son susceptibles cuando se exponen a soluciones de amonio. El único método para evitar la corrosión bajo tensión es evitar la exposición de los metales a soluciones corrosivas a las cuales sean susceptibles o reducir la magnitud del esfuerzo aplicado. Reducir el esfuerzo aplicado no es tan fácil como al principio parece, ya que las tensiones residuales del calentamiento desigual pueden ser suficientes. Un recocido térmico se puede utilizar para eliminar las tensiones residuales.

La ***corrosión erosiva*** resulta de la abrasión mecánica de un metal por un material corrosivo. Esencialmente, todos los metales son susceptibles a la corrosión erosiva, pero las aleaciones pasivas son afectadas particularmente porque la abrasión mecánica aleja la barrera de óxido que inhibe la corrosión. La presencia de burbujas o partículas suspendidas acelera el impacto de la corrosión erosiva y la velocidad de fluido acelerada incrementa la corrosión dramáticamente. La corrosión erosiva prevalece más en lugares en donde el flujo se hace turbulento, incluyendo los codos, curvaturas, o conexiones entre tuberías de diferentes diámetros. La corrosión erosiva puede ser minimizada al reducir la formación de turbulencias, removiendo los sólidos suspendidos y reduciendo la velocidad del fluido.

| *Corrosión erosiva* |
Pérdida del material resultante de la abrasión mecánica de un metal por un material corrosivo.

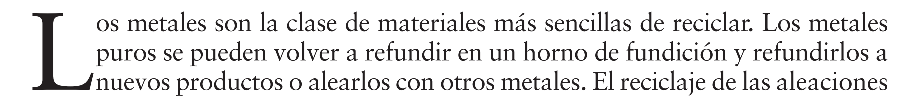
La ***lixiviación selectiva*** se refiere a la eliminación preferente de un constituyente de una aleación de metal. Cuando las aleaciones binarias experimentan la corrosión, ambas especies metálicas son reducidas y disueltas. Sin embargo, el metal que está más abajo en la serie galvánica tiende a permanecer en la solución mientras reemplaca el material más catódico. La instancia más común de la lixiviación selectiva es la pérdida de zinc en los latones. El cobre se reemplaca mientras que el zinc altamente anódico permanece en la solución. El resultado es una red cristalina de cobre deficiente en zinc con propiedades mecánicas significativamente reducidas. Las aleaciones de acero también tienden a perder preferentemente el níquel mediante el mismo mecanismo.

| *Lixiviación selectiva* |
Eliminación preferente de un constituyente de una aleación de metal.

¿Qué sucede con los metales después de su vida comercial?

4.9 RECLICAJE DE METALES





Los metales son la clase de materiales más sencillas de reciclar. Los metales puros se pueden volver a refundir en un horno de fundición y refundirlos a nuevos productos o alearlos con otros metales. El reciclaje de las aleaciones

| *Chatarra* |
Metal disponible para su reciclaje.

| *Chatarra nueva* |
Metal reciclado de fuentes de preconsumo.

| *Chatarra vieja* |
Metal reciclado de productos de consumo que han concluido su vida útil.

implica un poco más de reto pero opera de manera muy similar. En el 2005, Estados Unidos recicló más de 71 toneladas métricas de metales (solo por arriba de 50% de la provisión total),[1] con aproximadamente 80% proveniente del hierro y el acero (que son los metales industriales más ampliamente utilizados) y aproximadamente 9% del aluminio. El metal para reciclaje (o ***chatarra***) se clasifica como ***chatarra nueva*** cuando proviene de fuentes de preconsumo, incluyendo estampados, recortes, limaduras, virutas y cualquier material que no cumplió con las especificaciones. La ***chatarra vieja*** es material recuperado de productos de consumo que concluyeron su vida útil, incluyendo automóviles, aparatos, latas de bebidas y edificios comerciales.

Más de 70% de todo el acero es finalmente reciclado. Mucho del material es chatarra nueva que viene de plantas de procesamiento. Este material es reciclado con facilidad porque se conoce su composición exacta. Las mejoras en los métodos de fundición y maquinabilidad reducen la disponibilidad de chatarra nueva de acero. La fuente más grande de chatarra vieja de acero son los automóviles chatarra. Más de 12 000 compañías de desmantelamiento de automóviles operan en Estados Unidos, pero cantidades significativas vienen de edificios demolidos, vías de ferrocarril y aparatos.

La mayoría de las plantas de acero derriten la chatarra en hornos a base de oxígeno (BOF) o en hornos eléctricos (EAF). Actualmente, Estados Unidos exporta chatarra de acero a 44 diferentes países y China es la que compra mayor cantidad.

Cerca de 80% de todo el plomo utilizado industrialmente es reciclado, en parte por el costo y las dificultades para desecharlo. Las baterías son la fuente más común de plomo reciclado, contabilizando más de 90% del total. Cerca de 91% de la demanda doméstica total del plomo se puede cumplir con el plomo fundido de materiales reciclados.

El reciclaje de aluminio incluye aproximadamente 60% de chatarra nueva y 40% de chatarra vieja, con más de la mitad de la chatarra nueva proveniente de latas de bebidas recicladas. En el 2003, casi 50 mil millones de latas de aluminio fueron recicladas, contabilizando casi la mitad de las latas vendidas. Las latas de bebidas usadas son enviadas a instalaciones de fundición en donde son fragmentadas y pasadas por un fardo para remover cualquier pintura y residuo de humedad. El metal utilizado en latas de aluminio consiste de dos aleaciones distintas de aluminio-magnesio. La aleación en las partes superiores más altas contiene 4.5% de magnesio, mientras que los lados más formables contienen sólo 1% de magnesio. Algunas plantas calientan el aluminio a una temperatura en la que la aleación más dura se derrite y criba los sólidos remanentes para separar las aleaciones. Otras añaden la mezcla total en un horno de fundición a una mezcla de metal fundido con un bajo contenido de magnesio. Debido a que las latas recicladas contienen un porcentaje neto de aluminio de entre 1 y 4.5 por ciento, el exceso de metal fundido nuevo puede tener proporcionalmente menos magnesio y aun así formar un nuevo lote de la aleación de menor contenido de magnesio. La mezcla combinada es probada y luego moldeada en grandes lingotes, los cuales finalmente son laminados en hojas para hacer los lados de las latas.

Resumen del capítulo 4

En este capítulo se examinaron:

- Los propósitos y las diferencias de las cuatro operaciones de conformado.
- El principio de endurecimiento por deformación y cómo afecta a las propiedades mecánicas de los metales.
- Las tres etapas del recocido (recuperación, recristalización, crecimiento del grano) y su impacto en el trabajo en caliente.
- Cómo leer y marcar un diagrama de fase.
- Los medios para calcular las composiciones de fase utilizando ya sea la regla de la palanca o los balances explícitos de masas.
- Las propiedades únicas del acero al carbono, incluyendo el papel de la microestructura y el contenido de carbono en las estructuras de equilibrio y de no equilibrio.
- El rol de los elementos aleados en el acero.
- El proceso de difusión y su papel en las transformaciones de fase.
- El proceso de endurecimiento por envejecimiento y su impacto en las propiedades.
- Cómo utilizar un diagrama de transformación isotérmica (diagrama T-T-T) para determinar la cinética de las transformaciones de fase.
- Las propiedades únicas del cobre y sus aleaciones.
- La distinción entre aleaciones de aluminio fundidas y de forja.
- La naturaleza electroquímica de las reacciones de corrosión y los ocho tipos principales de corrosión.
- El reciclaje de metales industriales.

Referencia

[1]J. Papp, ed. *USGS 2005 Mineral Yearbook* (U.S. Department of the Interior, febrero de 2007)

Términos clave

acero al carbono *p. 118*
acero hipereutectoide *p. 121*
acero hipoeutectoide *p. 121*
acero inoxidable *p. 125*
aceros inoxidables austeníticos *p. 126*
aceros inoxidables ferríticos *p. 126*
aceros inoxidables martensíticos *p. 126*
aceros para herramientas *p. 126*
aleaciones *p. 110*
aleaciones de acero *p. 125*
ánodo *p. 137*
ánodo de sacrificio *p. 139*
ataque uniforme *p. 138*
austenita *p. 119*
austenizacion *p. 121*
bainita *p. 123*
bauxita *p. 135*
bronce *p. 132*
bronces de plomo *p. 134*
calcocita *p. 132*
calcopirita *p. 132*
cátodo *p. 137*
celda electroquímica *p. 138*
cementita *p. 119*
chatarra *p. 142*

chatarra nueva *p. 142*
chatarra vieja *p. 142*
cobre blister *p. 132*
cobres de baja aleación *p. 132*
conformado *p. 135*
corrosión *p. 137*
corrosión bajo tensión *p. 140*
corrosión erosiva *p. 141*
corrosión galvánica *p. 139*
corrosión intergranular *p. 140*
corrosión por grietas *p. 140*
crecimiento del grano *p. 108*
curva de finalización *p. 128*
curva de finalización al 50% *p. 128*
curva de inicio *p. 128*
diagrama de fase *p. 111*
diagrama de transformación isotérmica *p. 127*
designación de temple *p. 136*
difusión *p. 114*
difusión de la vacante *p. 115*
difusión insterticial *p. 114*
difusividad *p. 114*
electroquímica *p. 137*
endurecimiento por envejecimento *p. 131*
ensayo de templabilidad Jominy *p. 122*
esferoidita *p. 123*

estructura de Widmanstätten *p. 133*
eutéctico binario *p. 116*
eutéctico isotérmico *p. 117*
eutectoides *p. 117*
extrusión *p. 106*
fase *p. 110*
forja *p. 135*
forjado *p. 106*
fundido *p. 106*
galvanoplastía *p. 138*
herrumbre *p. 138*
hierro bruto *p. 119*
isomórfico binario *p. 111*
laminado *p. 106*
latón *p. 132*
línea de líquidus *p. 111*
línea de sólidus *p. 111*
líneas de solvus *p. 117*
líneas de unión *p. 112*
lixiviación selectiva *p. 141*
martensita *p. 121*
operaciones de conformado *p. 106*
oxidación *p. 137*
pasivación *p. 138*
peritécticos *p. 117*
perlita *p. 119*
perlita fina *p. 123*

perlita gruesa *p. 123*
picaduras *p. 140*
porcentaje de trabajo en frío (%cw) *p. 107*
primera ley de Flick *p. 114*
protección catódica *p. 139*
punto eutéctico *p. 117*
recocido *p. 108*
recristalización *p. 108*
recuperación *p. 108*
reducción *p. 137*
regla de la palanca *p. 112*
segunda ley de Flick *p. 115*
sensibilizados *p. 140*
serie galvánica *p. 138*
sinterizado *p. 119*
solubilidad *p. 110*
temperatura de recristalización *p. 109*
templabilidad *p. 123*
trabajo en frío *p. 106*
trabajo en caliente *p. 109*
transformación martensítica *p. 121*
tratamiento térmico de precipitación *p. 131*
tratamiento térmico de solución *p. 131*
trefilado *p. 106*

Problemas de tarea

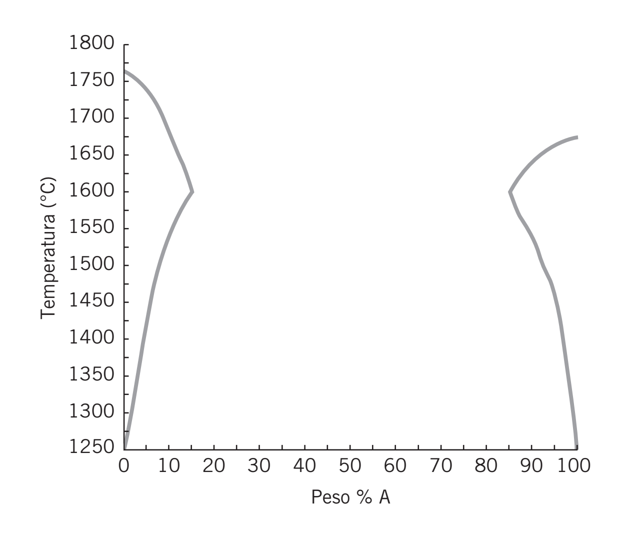
1. Evidencia reciente indica que la razón por la que se hundió tan rápidamente el *Titanic* fue porque el acero utilizado en su casco era muy frágil. Describa los papeles potenciales de la microestructura, contenido de carbono e impurezas en la fragilidad del acero.

2. El diagrama de fase parcial que se acompaña corresponde a los metales hipotéticos *A* y *B* que forman una aleación con fases α y γ. Adicionalmente, se sabe que una mezcla de 70% *A* y 30% *B* se derrite completamente a líquido a 1 600°C.

a) Dibuje las líneas faltantes en el diagrama de fase y marca las fases presentes en cada región.

b) Clasifique el sistema (por ejemplo, polimórfico ternario).

c) Calcule la fracción de masa del material en la fase a 1 500°C si la fracción de masa total de A es 40%.



d) Determine el porcentaje de peso de *A* en la fase γ a 1 500°C si la fracción de masa total de *A* es 40%.

e) Marque todo lo que aparecerá en su diagrama de fase: línea de solvus, línea de sólidus, línea de líquidus, punto eutéctico, punto eutectoide, punto peritéctico.

f) En vez de enfriarla lentamente, una muestra con 70% de *A* es rápidamente templada a 1 600°C a temperatura ambiente. ¿Qué efecto tendría esto en la microestructura del metal?

3. La perlita gruesa a la concentración de eutectoide es calentada a 600ºC. Prediga las fracciones presentes de masa de ferrita y cementita.

4. Tome el acero del problema 3 y caliéntelo a cerca de 700ºC durante 20 horas. Después compare la microestructura y las propiedades (dureza, ductilidad) del acero que produjo con las del acero con el que comenzó.

5. Una viga de acero se hace de perlita gruesa y una arquitecto decide que preferiría tener bainita. Obviamente, ella no desea volver a derretir la viga. Recomiende un proceso de tratamiento para convertir la viga a bainita y explique (en términos de propiedades) por qué la arquitecto podría preferir bainita en lugar de perlita o martensita.

6. Explique porqué las latas de aluminio no se pueden simplemente fundir (después de remover la laca) y reformar en nuevas latas.

7. Medio kg de acero 1040 se enfría de 770ºC a 500ºC y se le permite permanecer a esa temperatura durante varias horas.

a) Determine la cantidad y composiciones de cada una de las fases presentes.

b) Describa la microestructura.

c) ¿Se puede utilizar la gráfica *T-T-T* de la figura 4-23 para determinar el tiempo requerido para completar esta transformación de fase? Explique.

8. Con una curva de esfuerzo-deformación explique la influencia del trabajo en frío en la resistencia a la conformación y la ductilidad del acero.

9. Un acorazado se hundió porque su casco se corroyó. La Marina solicitó que se sugiera un método de prevención de corrosión para asegurar que esto no vuelva a pasar a futuros buques. ¿Qué métodos de prevención de corrosión sugeriría? ¿Por qué otros métodos son menos adecuados?

10. Explique las características de la corrosión erosiva y describa una situación en la que podría encontrar este tipo de corrosión.

11. Una aleación de cobre-zinc a su concentración eutectoide es enfriada de 900ºC a 770ºC.

a) Determine el porcentaje de peso de cada fase y el porcentaje de peso del zinc presente en cada fase.

b) ¿Sería el material propenso a tener una composición uniforme? Explique.

12. Explique la diferencia entre los siguientes términos:

a) Hipoeutectoide e hipereutectoide

b) Extrusión y trefilado

c) Dureza y templabilidad

d) Eutectoide y eutéctico

e) Líneas solidus y de solvus

13. Para cada uno de los siguientes tratamientos, prediga la microestructura resultante si todos los materiales comenzaran como acero euctectoide a 770ºC.

a) Enfriado rápidamente a 600ºC, mantenido por 2 minutos, luego templado.

b) Enfriado rápidamente a 600ºC, mantenido por 1 segundo, luego templado.

c) Enfriado rápidamente a 600ºC, mantenido por 5 segundos, luego templado.

d) Enfriado rápidamente a 400ºC, mantenido por 90 segundos, luego templado.

e) Enfriado rápidamente a 400ºC, mantenido por 10 minutos, luego calentado a 700ºC durante 20 horas.

14. Para cada uno de los siguientes tratamientos, prediga la microestructura resultante si todos los materiales comenzaran como acero euctectoide a 770ºC.

a) Enfriado rápidamente a 500ºC, mantenido por 1 minuto, luego templado.

b) Enfriado rápidamente a 700ºC, mantenido por 1 minuto, luego templado.

c) Enfriado rápidamente a 650ºC, mantenido por 30 segundos, luego templado.

d) Enfriado rápidamente a 100ºC, mantenido por 90 segundos, luego templado.

e) Enfriado rápidamente a 550ºC, mantenido por 10 minutos, luego calentado a 700ºC durante 20 horas.

15. Para cada uno de los siguientes tratamientos, prediga la microestructura resultante si todos los materiales comenzaran como acero euctectoide a 770ºC.

a) Enfriado a un rango de 140ºC por minuto.

b) Enfriado a un rango de 45ºC por minuto.

c) Enfriado a un rango de 15ºC por minuto.

16. Dados los siguientes datos para un metal hipotético, calcule el tiempo requerido para lograr una conversión a 90% de una fase γ a una fase α.

Fracción convertida	*Tiempo* (*s*)
0.25	200
0.50	280

17. Dados los siguientes datos para un metal hipotético, calcule el tiempo requerido para lograr una conversión a 90% de una fase γ a una fase α.

Fracción convertida	*Tiempo* (*s*)
0.10	100
0.25	170

18. ¿Por qué la bainita no se forma mediante el enfriamiento continuo del acero eutectoide?

19. Proporcione el proceso más directo para lograr las siguientes transformaciones para el acero eutectoide a temperatura ambiente:

a) Convertir esferoidita a bainita.

b) Convertir bainita a perlita.

c) Convertir perlita a martensita.

d) Convertir martensita a bainita.

e) Convertir perlita gruesa a perlita fina.

20. El acero al carbono con una resistencia a la tracción inicial de 800 MPa y una resistencia a la conformación de 650 MPa es extruido con una fuerza de 750 MPa. Describa la diferencia en las propiedades y microestructura que resultan del desarrollo de la extrusión por arriba o por debajo de la temperatura de recristalización.

21. Con base en el diagrama de fase plomo-estaño en la figura 4-11:

a) ¿Cuáles son las fracciones de masa de α y β presentes para un sistema que contiene 40 wt% de estaño a 100ºC?

b) ¿Cuánto estaño está presente en cada fase?

c) Si el material se calienta, ¿a qué temperatura se forma el primer líquido y cuál es la composición de la fase líquida a esa temperatura?

22. Identifica y clasifica todos los puntos invariantes en el diagrama de fase del acero.

23. ¿Cuál sería la designación probable de AISI/SAE para las siguientes aleaciones?

a) Acero con 0.9 de carbono y 5% de molibdeno.

b) Acero con 5% de manganeso y 0.2% de carbono.

c) Acero al carbono con 0.4% de carbono y sin tratamiento especial.

d) Acero con 7% de silicio y manganeso con 0.4% de carbono.

24. Identifique y clasifique todos los puntos invariantes en el diagrama de fase del latón.

25. Explique porqué el zinc se utiliza como un electrodo de sacrificio en los ambientes marinos y cómo es que su presencia protege los cascos de hierro de los barcos.

26. Una solución sólida que contiene 82% de zinc y 18% de cobre es enfriada de 1 000ºC a 20ºC.

a) ¿Cuándo es que el primer sólido se forma y qué fase es la que forma?

b) ¿Cuál es la composición del primer sólido?

c) ¿El sólido total formado en esta región tendrá la misma composición? Explique.

27. Identifique al menos dos aleaciones específicas de aluminio utilizadas en automóviles. Explique por qué el elemento de aleación primario fue elegido para cada aplicación.

28. Describa los roles del níquel y el cromo en los aceros inoxidables.

29. Describa una situación física en la que cada forma de corrosión se llevaría a cabo, y sugiera al menos dos métodos para reducir sus efectos.

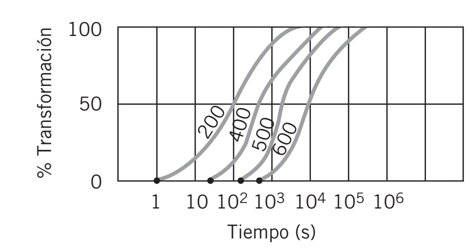
30. Comente las ventajas y desventajas de un elemento de aleación que forma carburos en los aceros aleados.

31. Explique los principios de operación de las cuatro operaciones de conformado.

32. El diámetro final de una muestra cilíndrica de metal que fue sometida a un trabajo en frío en 30% es de 7.5 cm. ¿Qué tan grande era la muestra original?

33. Explique por qué la segregación impacta las propiedades mecánicas.

34. Dadas las siguientes series de porcentajes de curvas de transformación, construya una gráfica *T-T-T* para un metal hipotético.



35. Identifique los elementos de aleación primarios, ya sea si el material es fundido o de forja, y cualquier temple desarrollado para las siguientes aleaciones de aluminio:

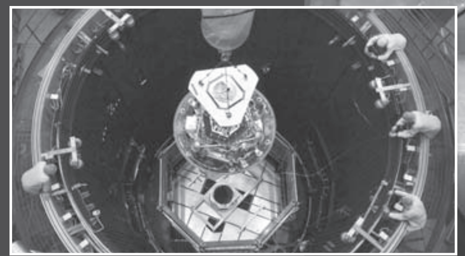
a) 2017

b) 300.3

c) 1199 H14

5 *Polímeros*

Corbis/SUPERSTOCK









CONTENIDO

Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el alumno debe ser capaz de:

- Explicar la terminología básica de los polímeros, incluyendo monómero, oligómero, copolímero, unidad estructural y grado de polimerización.
- Identificar las características de los polímeros termoplásticos y los polímeros termoestables.
- Explicar las diferencias entre copolímeros aleatorios, en bloque, alternantes y de injerto.
- Describir la estructura básica y propiedades de las principales clases de polímeros, incluyendo acrílicos, poliamidas (aramidas y nylons), poliésteres, poliolefinas, termoplásticos de alto volumen, rayón y elastómeros.
- Entender cuál es la temperatura de transición vítrea y su impacto en las propiedades del polímero.
- Reproducir la serie de reacciones correctas para generar un polímero de tamaño adecuado vía condensación o polimerización por adición.

- Explicar las diferencias entre la masa molecular relativa, el peso molecular promedio en número y el peso molecular promedio en peso.
- Explicar las diferencias entre los enlaces primario y secundario en polímeros.
- Mencionar la importancia de cuestiones como la naturaleza aditiva del enlace secundario, el impacto de la ramificación en las propiedades físicas y la diferencia entre redes de polímeros irregulares y ordenados.
- Identificar los carbonos asimétricos en las cadenas de polímeros.
- Distinguir entre las diadas sindiotácticas e isotácticas.
- Explicar qué es cristalinidad polimérica y por qué diferentes técnicas de análisis darán resultados diferentes.
- Entender el balance de las fuerzas de atracción y de repulsión que controlan la conformación.
- Describir la diferencia en los estados de energía entre las conformaciones eclipsada, sesgada, alternada y trans.
- Explicar la operación básica de los sistemas de extrusión de polímeros.
- Describir los principios operativos de los dispositivos hiladores, las unidades de soplado de película, los troqueles y los aparatos de moldeo por inyección.
- Explicar por qué ninguna de las técnicas a base de extrusión funcionará para los plásticos termoestables y cómo se procesan.
- Comentar los retos asociados al reciclaje comercial de materiales poliméricos.

¿Qué son los polímeros?

| ***Polímeros*** |
Cadenas de moléculas enlazadas covalentemente con unidades monómeras pequeñas repetidas de extremo a extremo.

| ***Monómeros*** |
Bloques de construcción de bajo peso molecular repetidos en la cadena polimérica.

| ***Oligómeros*** |
Cadenas pequeñas de monómeros enlazados cuyas propiedades serán alteradas por la adición de una unidad más de monómero.

5.1 TERMINOLOGIA DE LOS POLÍMEROS

La palabra *polímero* viene de la raíz griega "poli", que significa muchos, y "meros", que significa unidades o partes. Los ***polímeros*** son cadenas enlazadas de unidades repetidas con enlaces covalentes de extremo a extremo. Los bloques de construcción que se repiten en la cadena se llaman ***monómeros***. Conforme los monómeros empiezan a conectarse entre sí para formar cadenas, se convierten en ***oligómeros***. Conforme más monómeros se agregan a la cadena oligómera, ésta crece y al final se convierte en un polímero con la adición de una unidad más de monómero que no tendrá un efecto discernible en las propiedades de la cadena.

Un polímero puede tener 10 000 o 1 000 000 de unidades monómeras repetidas en una cadena, que hace impráctico el dibujar la molécula completa del polímero. En su lugar, la cadena de polímeros se identifica por su ***unidad estructural*** (o unidad de repetición), que es la parte más pequeña de la cadena que se repite. La unidad estructural del poliestireno se muestra en la figura 5-1.

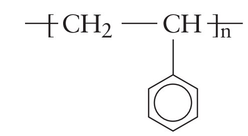


Figura 5-1 Unidad estructural del poliestireno

La n representa el número de veces que la unidad estructural se repite en la cadena. Por supuesto, los polímeros no están hechos de una cadena a la vez. Grandes números de cadenas empiezan a formarse en forma simultánea, y diferentes cadenas crecen a diferentes longitudes. El número de unidades de repetición se llama ***grado de polimerización*** de la cadena polimérica y se representa por el símbolo $\overline{DP}_n$.

| *Unidad estructural* | Unidad más pequeña que se repite en un polímero. También conocida como unidad de repetición.

| *Grado de polimerización* | Número de unidades de repetición en una cadena polimérica.

Los átomos enlazados covalentemente (usualmente el carbono) incluyen el largo centro repetido de la cadena llamado ***esqueleto del polímero***. Los átomos anexados al esqueleto se llaman ***grupos laterales*** o sustituyentes. El hidrógeno es el grupo lateral más común, pero los grupos metilo, los anillos de benceno, las moléculas de hidróxido, los heteroátomos, o incluso otras cadenas de polímeros pueden fungir como grupos laterales de igual manera. Cuando se dibuja una cadena de polímeros, cualquier grupo lateral que no se muestra específicamente se asume como hidrógeno.

| *Esqueleto del polímero* | Átomos enlazados covalentemente, casi siempre de carbono, que componen el centro de la cadena de polímeros.

| *Grupos laterales* | Átomos anexados al esqueleto del polímero. También llamados sustituyentes.

Los polímeros se clasifican con base en su habilidad para ser refusionados y reconformados. Los ***termoplásticos*** fluyen como líquidos viscosos cuando se calientan y continúan así cuando se recalientan y se reenfrían múltiples veces. Los termoplásticos usualmente se producen en masa como pellets que se pueden pintar, derretir y reconformar por los usuarios finales. Mientras que las cadenas individuales en los termoplásticos tienen enlaces covalentes a lo largo de su eje primario, el enlace entre las cadenas usualmente está limitado a interacciones débiles de van der Waals. En la mayoría de los casos no hay un orden tridimensional entre las cadenas y generalmente un leve orden bidimensional, si es que lo hubiera. El aparente posicionamiento relativo al azar de las cadenas adyacentes con frecuencia se describe como “espagueti en un plato”, como se muestra en la figura 5-2. La falta de enlace entre cadenas reduce la resistencia a la tracción de los termoplásticos pero los hace relativamente fáciles de reciclar.

| *Termoplásticos* | Polímeros con bajos puntos de fusión debido a la falta de enlace covalente entre las cadenas adyacentes. Dichos polímeros repetidamente se pueden fusionar y reconformar.

En contraste, cuando los químicos que forman los ***polímeros termoestables*** se calientan, éstos lentamente pasan a una reacción de entrecruzamiento químico irreversible que enlaza entre sí a las cadenas y causa que el líquido se vuelva una masa sólida infusible. Una vez que se solidifica, los polímeros termoestables no se pueden refusionar o reconformar. Por esta razón, la reacción de polimerización se lleva a cabo en un molde o en un dispositivo hilador de fibra para que el polímero termoestable de inmediato tome su forma final. El entrecruzamiento entre cadenas, ilustrado en la figura 5-2, hace que los polímeros termoestables sean más fuertes y más resistentes a la degradación química que los termoplásticos, pero también los hace más difíciles de reciclar.

| *Polímeros termoestables* | Polímeros que no se pueden fusionar y reconformar repetidamente debido a un enlace covalente fuerte entre cadenas.

Las decisiones respecto al uso de polímeros termoestables o de termoplásticos para aplicaciones específicas crea dilemas éticos interesantes. El costo y el impacto ambiental favorecen el uso de los termoplásticos. Imagine si las bolsas del supermercado las fabricaran más resistentes al usar polímeros termoestables, pero no se podrían reciclar y costarían 25 centavos de dólar cada una. En contraste, el equipamiento de aviación, los materiales de resistencia balística y muchos otros artículos militares demandan un desempeño más alto que los polímeros termoestables ofrecen.



Muchos polímeros están hechos de una sola unidad estructural repetida muchas veces, pero ésta no es la única posibilidad. Cuando un polímero se forma a partir de la polimerización de dos o más monómeros se llama ***copolímero***. Hay cuatro distintas clasificaciones para los copolímeros hechas a partir

| *Copolímero* | Polímero hecho de dos o más monómeros diferentes enlazados en forma covalenteme entre sí.

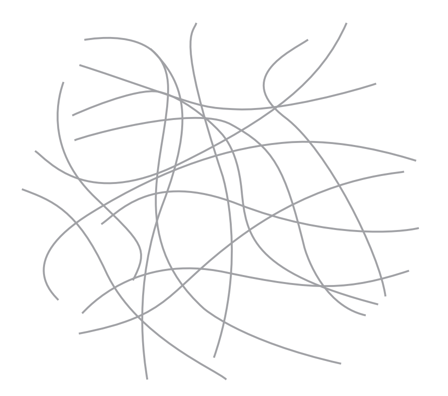
de dos monómeros (A y B) que distinguen cómo los monómeros se mezclan. Estas clasificaciones se muestran en la figura 5.3.

| ***Copolímeros aleatorios*** | Polímeros compuestos de dos o más monómeros diferentes, que se anexan a una cadena de polímeros sin un orden o patrón particular.

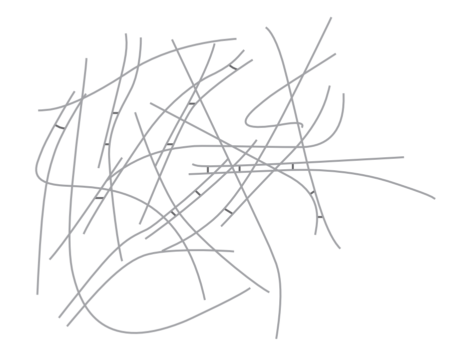
| ***Copolímeros alternantes*** | Polímeros compuestos de dos o más unidades de monómeros diferentes que se anexan a la cadena en un patrón alternante (A-B-A-B-A-B).

Copolímeros en bloque | Polímeros compuestos de dos o más monómeros diferentes que se anexan a la cadena en tiras largas de un tipo de monómero, seguidas de tiras largas de otro monómero (AAAAAAABBBBBBBAAAAA).

Los ***copolímeros aleatorios*** que se agregan, ya sea a un monómero en cualquier orden, de tal forma que la probabilidad del siguiente enlace de la cadena sea un monómero A o un monómero B no se ve afectada por la identidad del último monómero. En contraste, los ***copolímeros alternantes*** siempre están seguidos del monómero A con el monómero B y viceversa. La longitud de la cadena puede variar, pero siempre seguirá el patrón A-B-A-B. Los ***copolímeros en bloque*** involucran tiras largas del monómero A, seguido de largas tiras del monómero B, seguido de más monómeros A.

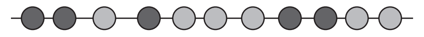


Termoplásticos
- Fluyen como líquidos viscosos cuando se calientan y continúan haciéndolo cuando se recalientan y se reenfrían múltiples veces
- Fuerzas débiles de van der Waals entre cadenas
- Posicionamiento relativo al azar de las cadenas adyacentes

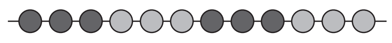


Polímeros termoestables
- No se pueden refusionar o reconformar
- Fuerte entrecruzamiento entre cadenas debido a las fuerzas de van der Waals
- Más fuertes y más resistentes a la degradación química que los termoplásticos, pero también difíciles de reciclar

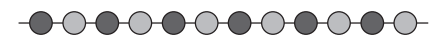
Figura 5-2 Termoplásticos contra polímeros termoestables



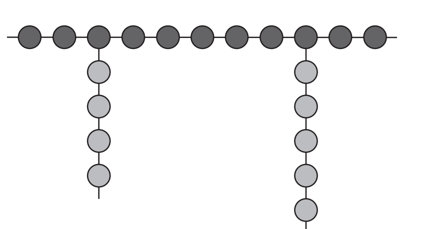
Al azar: no hay un patrón particular de los monómeros



En bloque: largas tiras de un monómero, seguidas de largas tiras de otro, seguidas de más del primero



Alternante: un monómero siempre está seguido del otro y viceversa



De injerto: cadena de un monómero conectada como sustituyente a una cadena del otro monómero

Figura 5-3 Clases de copolímeros

Un ***copolímero de injerto*** resulta cuando una cadena de un monómero (B) está conectado como sustituyente a una cadena del otro monómero (A).

| *Copolímeros de injerto* |
Polímeros en los cuales una cadena de un monómero particular es anexado como una cadena lateral a una cadena de otro tipo de monómero.

Las ***mezclas*** de polímeros se forman por la combinación mecánica de polímeros. Las mezclas permiten a los materiales experimentar un rango más amplio de propiedades sin pasar por la dificultad y el gasto de tratar de sintetizar un solo polímero con la misma combinación de propiedades. Las mezclas tienden a exhibir propiedades entre aquellas de los polímeros originales. Por ejemplo, la tenacidad del poliestireno se puede mejorar mediante la mezcla de pequeñas cantidades de un polímero de caucho que absorbe la energía de impacto. Las superficies artificiales para pistas de atletismo son una mezcla de poliuretano y caucho. Las mezclas son más difíciles de reciclar debido a los problemas en la separación de los polímeros originales.

| *Mezclas* |
Dos o más polímeros combinados mecánicamente pero sin enlace covalente entre ellos.



5.2 TIPOS DE POLÍMEROS

El nombramiento de los polímeros es complejo y a veces confuso. Los polímeros que ocurren más naturalmente fueron nombrados por la fuente del polímero (por ejemplo, celulosa a partir de células de plantas) o por la naturaleza del polímero (por ejemplo, los ácidos nucleicos). Los primeros polímeros sintéticos fueron nombrados a partir de los monómeros que se usaron en su preparación. Por ejemplo, las moléculas hechas del etileno fueron llamadas polietilenos. A veces fueron nombrados por elementos presentes en la cadena de polímeros, como los poliésteres. La International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ha desarrollado un sistema de nomenclatura que usa reglas estrictas para nombrar a los polímeros. Desafortunadamente, los nombres de la IUPAC y los nombres comunes siguen en uso. Además, los polímeros comerciales suelen ser conocidos por sus nombres IUPAC, por una abreviación corta, ya que los nombres IUPAC en general son largos y engorrosos, y por uno o más nombres de marca comerciales. Las fibras utilizadas para los chalecos resistentes a las balas están fabricados con poliparafenileno tereftalamida, que se abrevia (PPTA) y vendidos bajo los nombres Kevlar® (DuPont) o Twaron® (Teijin). La figura 5-4 muestra la unidad estructural del PPTA.

La complejidad de los esquemas de nombres hace más útil aprender acerca de las clases básicas de los polímeros comerciales. Las fibras de ***acrílico*** contienen por lo menos 85% de poliacrilonitrilo (PAN), que se muestra en la figura 5-5. Los acrílicos son de peso ligero y durables, lo cual los hace ideales para alfombras y ropa. Orlon® (DuPont) y Acrilan® (Solutia) son nombres comerciales comunes para las fibras acrílicas. La fibra acrílica más significativa comercialmente es el polimetilmetacrilato (PMMA), que se muestra en la figura 5-6. El PMMA es transparente y no se quiebra, haciéndolo útil para faros en autos y en las barreras plásticas protectoras que rodean a las pistas

| *Acrílicos* |
Tipo de polímero que contiene por lo menos 85% de poliacrilonitrilo (PAN).



• Nombres comerciales: Kevlar®, Twaron®
• Alta resistencia a la tracción, peso ligero, susceptible a la degradación ultravioleta, no conductor
• Usado para armaduras resistentes a la balas, equipo deportivo, vestuario resistente al fuego

Figura 5-4 Unidad estructural del poliparafenileno tereftalamida (PPTA)

Cortesía de James Newell



$-\!\!\!+\!CH_2 - CH\!+_n\!-$ (con $C \equiv N$ unido al CH)

- Nombres comerciales: Orlon®, Acrilan®
- Peso ligero, durable
- Precursor de la fibra de carbono
- Usado en raquetas de tenis, bicicletas para carreras, cascos

Figura 5-5 Unidad estructural del poliacrilonitrilo (PAN)

David Morgan/iStockphoto (bicicleta de montaña); PhotoDisc/Getty Images (casco)



$-\!\!\!+\!C - CH_2 - C - CH_2\!+_n\!-$ (cada C con CH_3 arriba y $C{=}O$ / OCH_3 abajo)

- Nombres comerciales: Plexiglas®, Lucite®
- Transparente, a prueba de quebraduras, biocompatible
- Usado en pistas de hockey, luces traseras, implantes

Figura 5-6 Unidad estructural del polimetilmetacrilato (PMMA)

Cortesía de James Newell

El PMMA es biológicamente compatible y se utiliza en una gran variedad de aplicaciones, incluyendo implantes para reparar huesos, dentaduras y lentes de contacto duros. El PMMA también es un ingrediente clave en la pintura acrílica. El PMMA se vende bajo la marca Lucite® (Lucite).

> **| *Poliamidas* |** Polímeros que contienen grupos amida (—N—) en la cadena.
>
> **| *Aramidas* |** Polímero en el cual más de 85% de los grupos amida están enlazados a dos anillos aromáticos.
>
> **| *Nylon* |** Tipo de poliamida en el cual menos de 85% de los grupos amida están enlazados a anillos aromáticos.

Las ***poliamidas*** son polímeros que contienen grupos amidas ($CONH_2$) en la cadena. Las poliamidas están clasificadas más con base en el enlace de los átomos de nitrógeno en el polímero. Si más de 85% de los grupos amidas están enlazados a dos anillos aromáticos, el polímero es considerado una ***aramida***. La fibra de poli-p-fenileno benzobisoxazol (PBO), que se muestra en la figura 5-7, es una fibra de aramida que se vende bajo el nombre comercial de Zylon® (Toyobo). Las aramidas muestran una resistencia a la tracción y una resistencia al calor excepcionales, haciéndolas ideales para uso en materiales balísticos, cuerdas y como fibras de refuerzo en compuestos.

Las fibras de ***nylon*** son poliamidas con menos de 85% de los grupos amida enlazados a anillos aromáticos. Las fibras de nylon son durables y muy fuertes,



[Estructura de la unidad repetitiva del PBO: anillos de benzobisoxazol (N, O) unidos a un anillo de fenileno, entre corchetes con subíndice n]

- Nombre comercial: Zylon®
- Transparente, a prueba de quebraduras, biocompatible
- Usado en pistas de hockey, luces traseras, implantes

Figura 5-7 Unidad estructural del poli-p-fenileno benzobisoxazol (PBO)

Cortesía de James Newell

aunque típicamente no tan fuertes como las aramidas. También son fáciles de teñir y expansibles. El nylon fue inventado en 1935 por Wallace Carothers de DuPont y tuvo su primer impacto en las cerdas de los cepillos de dientes en 1938. Para 1940, las medias de nylon se volvieron un éxito de marketing. El nylon también se utilizó para reemplazar a la seda en los paracaídas. El nombre *nylon* nunca fue registrado como marca y ahora se refiere a una variedad de materiales, pero el más comúnmente usado es el Nylon 6,6, que se muestra en la figura 5-8.

El Nylon 6,6 se vende bajo una variedad de nombres comerciales, incluyendo Capron® (Allied Signal), Dartek® (DuPont), Primamid® (Prima Plastics) y Celanese® (Ticona). Los grupos amida polares en el esqueleto de la fibra facilitan que las cadenas adyacentes experimenten el enlace de hidrógeno entre sí, mejorando significativamente la fuerza y la cristalinidad de las fibras.

Los ***poliésteres*** son polímeros de cadenas largas que contienen por lo menos 85% de un éster (C—O—C) de un ácido carboxílico aromático sustituido. Las fibras de poliéster son fuertes y se pueden teñir o hacer transparentes. El poliéster más común, el polietilen tereftalato (PET), se usa en botellas transparentes para bebidas y fibras para alfombras. El PET, figura 5-9, funge como 5% de todos los polímeros comerciales. Los poliésteres resisten el mancharse y el encogerse y han encontrado un uso muy amplio en ropa. Dacron® (Invista) y Mylar® (DuPont Teijin) son nombres de las marcas para otros productos de poliéster.

Las ***poliolefinas*** son polímeros similares al aceite que contienen sólo hidrógeno y carbono alifático (no aromático) en el polímero. El polietileno (PE) y el

| *Poliésteres* |
Polímeros de cadena larga que contienen por lo menos 85% de un éster de un ácido carboxílico aromático sustituido. Estas fibras son fuertes y se pueden teñir o hacer transparentes.

| *Poliolefinas* |
Polímeros que contienen sólo hidrógeno y carbono alifático.



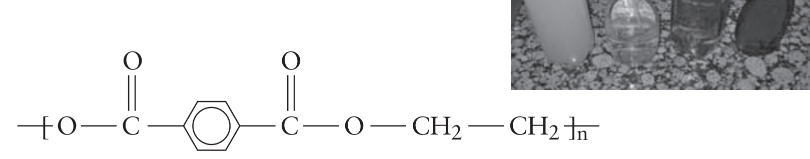
Figura 5-8 Unidad estructural del Nylon 6,6

Cortesía de James Newell

- Nombres comerciales: Capron®, Dartek®, Primamid®, Celanese®
- Durable, fuerte, fácil de teñir, estirable
- Utilizado en ropa, cuerdas, cerdas de cepillos de dientes

$$\left[-NH-(CH_2)_6-NH-C(=O)-(CH_2)_4-C(=O)- \right]_n$$

- Nombres comerciales: Dacron®, Mylar®
- Fuerte, fácil de teñir, transparente, resistente a las manchas
- Utilizado en ropa, alfombras y botellas de plástico



$$\left[-O-C(=O)-C_6H_4-C(=O)-O-CH_2-CH_2- \right]_n$$

Figura 5-9 Unidad estructural del polietilen tereftalato (PET)

Cortesía de James Newell

polipropileno (PP) son dos de las poliolefinas más comunes. El polietileno es el más sencillo de todos los polímeros con una cadena de carbono sencilla completamente saturada con átomos de hidrógeno, como se muestra en la figura 5-10. El polietileno no es caro, es fácil de fabricar y resistente a los químicos.

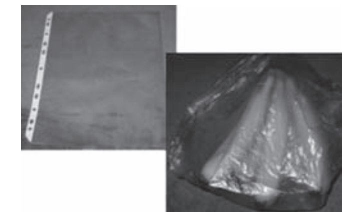
Las propiedades del polietileno cambian significativamente dependiendo de la naturaleza de la cadena. Bajo condiciones de alta temperatura y alta presión, algunos de los átomos de hidrógeno son desprendidos y reemplazados por otras cadenas de polietileno. La formación de cadenas laterales a lo largo del esqueleto del polímero se llama ***ramificación***. La presencia de ramificaciones rompe las interacciones entre las cadenas adyacentes, bajando la resistencia a la tracción, el punto de fusión, la rigidez, la cristalinidad y la densidad del polímero.

| ***Ramificación*** | Formación de cadenas laterales a lo largo del esqueleto del polímero.

El polietileno de baja densidad (LDPE) contiene muchas ramificaciones que suelen ser relativamente largas. El polímero resultante tiene baja cristalinidad y menor resistencia, pero mayor flexibilidad. El LDPE se fusiona a bajas temperaturas y es fácil de procesar, haciéndolo ideal para aplicaciones de alto volumen donde la resistencia no es crítica. Muchas envolturas de plástico, juguetes, bolsas para alimentos y botellas que se comprimen están hechos con LPDE.

El polietileno de alta densidad (HDPE) es químicamente idéntico al LDPE pero es más lineal con menos ramificaciones. El polímero resultante es más fuerte y más cristalino. Las botellas de leche, las bolsas para basura, los tanques de almacenamiento químico y los vasos de plástico están hechos con HDPE. Las marcas para las resinas HDPE incluyen a Paxon® (Exxon-Mobil Chemical) y Unival® (Dow).

El polipropileno (PP) es similar al polietileno, pero un grupo metil ($—CH_3$) reemplaza uno de los cuatro hidrógenos en la unidad estructural, como se muestra en la figura 5-11. El polímero resultante es mucho más rígido que el polietileno, pero también más duro y más resistente a la abrasión. El polipropileno también se derrite a mucha más alta temperatura que el PE pero aun así es más económico de producir. Esta combinación de propiedades hace al polipropileno ideal para muebles, utensilios a prueba de lavavajillas, platos, cafeteras, popotes, contenedores de DVD y dispositivos médicos que deben esterilizarse.

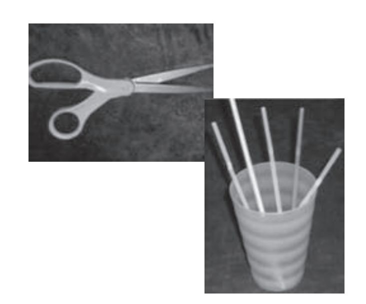


- Nombres comerciales: Paxon®, Unival®
- Estructura polimérica más sencilla
- Económico
- Utilizado para bolsas de plástico, juguetes, almacenamiento químico

$$-\!\!\left[CH_2 - CH_2 \right]_n\!\!-$$

Figura 5-10 Unidad estructural del polietileno (PE)

Cortesía de James Newell



- Nombres comerciales: Ektar®, Fortilene®e
- Rígido, económico, resistente a la abrasión, alto punto de fusión
- Utilizado para popotes, utensilios de cocina, gabinetes de televisión, asientos para estadios

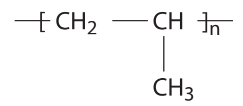


Figura 5-11 Unidad estructural del polipropileno (PP)

Cortesía de James Newell



- Nombres comerciales: Bemberg®, Galaxy®, Danufil®, Viloft®
- Ligero, absorbe bien el agua, cómodo, suave, fresco
- Utilizado para ropa, muebles para el hogar

Figura 5-12 Unidad estructural del rayón

Cortesía de James Newell

| *Rayón* |
Polímero de peso ligero que absorbe bien el agua; el primer polímero sintético que se construyó.

| *Proceso viscoso* |
Técnica usada para hacer el rayón, que involucra el tratar la celulosa a partir de la madera o el algodón con alquilo y extruir éste a través de un dispositivo hilador.

| *Termoplásticos de alto volumen (HVTP)* |
Materiales poliméricos sencillos producidos como pellets en grandes cantidades.

El ***rayón*** fue la primera fibra sintética de polímero desarrollada. El ***proceso viscoso***, en el cual la celulosa a partir de la madera o el algodón se trata con alquilo luego extruida a través de un dispositivo hilador, data de 1892. El rayón inicialmente fue llamado *seda artificial*, y todavía es referido como *celulosa regenerada*. El rayón es de peso ligero y absorbe bien el agua, haciéndolo útil para ropa y mobiliario doméstico, incluyendo cobijas y sábanas. La estructura del rayón se muestra en la figura 5-12.

Los polímeros de cloruro de polivinilideno (PVDC) son mejor conocidos por su nombre comercial Saran® (Dow). El PVDC, figura 5-13, se produce en películas delgadas con moléculas unidas estrechamente que crean una barrera contra la humedad y el oxígeno. Como tal, el material es ideal para envolver alimentos.

El poliestireno y el cloruro de polivinilo son los otros ***termoplásticos de alto volumen (HVTP)*** que este libro considerará. El poliestireno (PS) es químicamente similar al polietileno, pero uno de los átomos de hidrógeno es reemplazado por un anillo aromático, como se muestra en la figura 5-14. El poliestireno es rígido, proporciona excelente aislamiento térmico y puede fabricarse transparente o en una amplia variedad de colores, siendo el uso más constante en vasos desechables para café y estuches para CD. El uso más común del poliestireno es como un poliestireno expandido, que consiste de 5% de poliestireno y 95% de aire. Dow Chemical fabricó el poliestireno expandido bajo el nombre comercial Styrofoam®. El poliestireno expandido se puede moldear muy fácil en una variedad de formas; por esa razón, la mayoría de los materiales de embalaje hechos a la medida y los cacahuates de embalaje están hechos con poliestireno expandido. Inicialmente, los clorofluorocarbonos que dañan el medio ambiente

- Nombres comerciales: Saran®, Diofan®, Ixan®
- Barrera contra la humedad y el oxígeno, duro
- Utilizado para envolver comida, constituyente común de muchos copolímeros

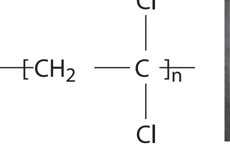




Figura 5-13 Unidad estructural del cloruro de polivinilideno (PVDC)

Cortesía de James Newell



- Nombres comerciales: Novacor®, Styrofoam®
- Económico, rígido, térmicamente aislante
- Utilizado para material de embalaje, estuches para CD, vasos desechables para bebidas calientes

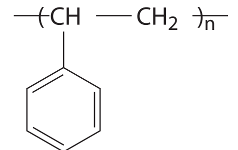


Figura 5-14 Unidad estructural del poliestireno (PS)

Cortesía de James Newell

(CFC) se usaron en el proceso de soplado de aire en el poliestireno expandido, pero ahora todos los fabricantes usan agentes de soplado más benignos.

El cloruro de polivinilo (PVC) es un polímero en extremo inerte y rígido que ha encontrado un uso diseminado ampliamente en la construcción. Los laterales de vinilo en algunas construcciones, las tuberías y las botellas de aceite para cocinar están hechas de PVC. Si los agentes ablandadores llamados *plastificadores* se agregan, el PVC se puede usar también en pisos, tapicería de autos, dispositivos médicos y algunos cables eléctricos. El PVC es un aislante eléctrico excelente y es resistente al clima. El polímero también es similar al polietileno, pero un átomo de cloro reemplaza uno de los átomos de hidrógeno, como se muestra en la figura 5-15. Los átomos de cloro también hacen al polímero resistente a las flamas. En años recientes ha surgido la gran preocupación concerniente al uso ampliamente diseminado del PVC y su rol en la contaminación por dioxina cuando se entierra en basureros. Las dioxinas cloradas se forman durante la producción o combustión de compuestos orgánicos que contienen cloro. Avances significativos se han logrado en la reducción de la producción de dioxinas durante la fabricación del PVC, pero los incendios en casas, la quema de basura en patios e incendios en basureros municipales que contienen desechos de PVC crean cantidades importantes de dioxinas, con frecuencia por arriba del límite de seguridad. Poblaciones completas que incluyen Love Canal, Nueva York y Times Beach, Missouri han sufrido problemas significativos debido a la contaminación por dioxina. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) enlista a las dioxinas cloradas como una amenaza grave para la salud pública.

| *Elastómeros* |
Polímeros que pueden estirarse hasta 200% o más y aun así regresar a su longitud original cuando el estiramiento se libera.

| *Poliuretanos* |
Amplia categoría de polímeros que incluye todos los polímeros que contienen enlaces de uretano.

Los ***elastómeros*** se definen ampliamente como polímeros que se pueden estirar hasta 200% o más y luego regresar a su longitud original cuando la tensión se libera. Aunque hay muchos tipos de elastómeros, la clase se puede dividir en poliuretanos y plásticos termoestables alifáticos (o cauchos).

Los ***poliuretanos*** son polímeros con enlaces de uretano, como el que se muestra en la figura 5-16, en su esqueleto. La definición amplia resulta en una amplia variedad de materiales que caen en la clasificación del poliuretano. Muchos poliuretanos se utilizan para hacer espuma, incluyendo los cojines de hule espuma en la mayoría de sillas y sillones. En forma líquida, el poliuretano se utiliza como sellador de pintura o de agua. Quizá la aplicación más famosa del poliuretano es el Spandex®, una fibra de polímero flexible que fácilmente se estira y recupera su forma. Las fibras de Spandex® contienen por lo menos 85% de poliuretano y tienen propiedades únicas. Pueden estirarse hasta más de 500% y recuperar su forma, son resistentes al sudor, los aceites corporales y los

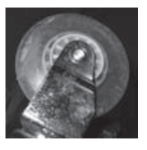


- Nombres comerciales: Geon®, Viclon®
- Bajo costo, resistente a los químicos y a la humedad, estabilidad en exteriores
- Utilizado para tuberías, tapicería, pisos, cables eléctricos y dispositivos médicos

$$-\!\!\left(\underset{\displaystyle \underset{|}{} \atop Cl}{CH} - CH_2\right)_n\!\!-$$

Figura 5-15 Unidad estructural del cloruro de de polivinilo (PVC)

Cortesía de James Newell



- Nombres comerciales: Esthane®, Spandex®, Pellanthane®
- Bajo costo, resistente a los químicos y a la humedad, estabilidad en exteriores
- Utilizado para cojines de hule espuma, ropa deportiva, llantas de motonetas, recubrimientos

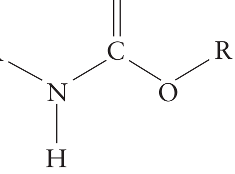


Figura 5-16 Enlace de uretano en un polímero (poliuretano)

Cortesía de James Newell

detergentes. Las primeras aplicaciones de Spandex® reemplazaron al hule en los paneles y tirantes de los brassieres de las mujeres, pero el mercado ha crecido a un amplio rango de ropa deportiva. El Spandex® deriva sus propiedades a partir de las fibras poliméricas que tienen una mezcla de regiones rígidas y regiones flexibles, como se muestra en la figura 5-17. El Spandex® se vende bajo los nombres comerciales de Lycra® (Invista) y Dorlasten® (Bayer).

Por siglos, los nativos sudamericanos han producido hule natural a partir de la savia del árbol del hule (*Hevea braziliensis*). A partir del siglo XVI, después de la llegada de los europeos, el hule encontró usos comerciales en zapatos, recubrimientos a prueba de agua y una gran variedad de otros productos. Sin embargo, los hules naturales suelen ablandarse y agrietarse a altas temperaturas. Charles Goodyear agregó sulfuro al hule a una temperatura elevada y descubrió que entrecruzamientos químicos se formaron entre las cadenas de polímeros adyacentes en un proceso que se conoce como ***vulcanización***. Éste fortaleció el material sustancialmente sin dañar de manera importante las propiedades elásticas. La cadena polimérica en el hule natural consiste en principio de isopreno, que se muestra en la figura 5-18.

| *Vulcanización* |
Proceso mediante el cual los entrecruzamientos químicos se pueden formar entre cadenas de polímeros adyacentes, fortaleciendo el material sin dañar significativamente las propiedades elásticas.

La vulcanización puede ocurrir debido a que el esqueleto del polímero todavía contiene enlaces dobles. Los átomos de sulfuro forman los enlaces primarios entre los átomos de carbono en cadenas de polímeros adyacentes. Un máximo de dos enlaces transversales son posibles por unidad estructural, aunque cuestiones estéricas hacen que el número real sea significativamente más bajo.

La ubicación del grupo metilo en el esqueleto del polímero juega un rol importante en las propiedades del polímero. Cuando la mayoría de las unidades estructurales tienen el grupo metilo en el mismo lado (configuración cis-), el material es muy elástico y se puede suavizar fácilmente. La configuración cis- es dominante en el hule natural. Sin embargo, cuando los grupos metilo ocurren en direcciones opuestas (configuración trans-), el polímero se vuelve más duro y menos elástico. El poli-trans-isopreno, a veces llamado *balata*, se usa en suelas de zapatos y se usó en el centro de las pelotas de béisbol durante la Segunda Guerra Mundial, pero fue rápidamente reemplazado cuando la producción de anotaciones en home cayó.

El polibutadieno es un elastómero sintético desarrollado durante la producción de la Segunda Guerra Mundial, cuando el abastecimiento de hule natural de Estados Unidos se vio amenazado. La estructura química del polibutadieno es similar a la del poliisopreno, pero el grupo metilo es reemplazado por un átomo de hidrógeno, como se muestra en la figura 5-19. El grupo metilo faltante reduce la resistencia a la tracción, la rigidez y la resistencia a los solventes. Sin embargo, el polibutadieno es mucho más barato que el poliisopreno y se adhiere bien a los metales. Alrededor de 70% del polibutadieno producido se utiliza en

Figura 5-17 Unidad estructural del Spandex (x puede ser cualquier longitud pero de 40 a 50 es común)

- Otros nombres: hule natural, hule isopreno
- Usado para aditivos en llantas y suelas de zapatos

Figura 5-18 Estructura del poliisopreno

llantas. El resto se utiliza como endurecedor en mezclas con otros polímeros.

El policloropreno es un hule sintético desarrollado por Wallace Carothers en DuPont. La estructura del policloropreno es similar a la del polibutadieno, pero uno de los átomos de hidrógeno en los carbonos de enlaces dobles se reemplazan por un átomo de cloro, como se muestra en la figura 5-20. El átomo de cloro grande mejora la resistencia a los aceites, la fuerza, la rigidez, la resistencia a las llamas y la estabilidad térmica del polímero. El enlace entre las cadenas de polímeros se logra mediante un proceso de vulcanización en el cual los óxidos de metal forman conectores de oxígeno entre las cadenas adyacentes. DuPont inicialmente nombró al polímero "Duprene" pero actualmente se vende el policloropreno bajo la marca Neoprene®.

El policloropreno se usa en trajes de baño, botas, guantes de latex, espumas moldeables, cables y como materias primas para adhesivos.

Los diversos polímeros descritos en esta sección muestran una amplia variedad de propiedades; sin embargo, un rango incluso más grande se puede lograr al mezclar los polímeros. Los polímeros mezclados son materiales adecuados para numerosas aplicaciones, pero la selección del mejor polímero para una tarea específica no es algo trivial. La tabla 5-1 enlista las propiedades físicas y mecánicas clave para los polímeros mencionados en esta sección.

| *Temperatura de transición vítrea* | Transición termodinámica de segundo orden en la cual el inicio de movilidad de una cadena a gran escala ocurre en los polímeros. Por debajo de T_g, el polímero se parece al vidrio y es frágil. Por arriba de T_g, el polímero se vuelve chicloso y flexible.

Aunque las propiedades en la tabla 5-1 son familiares (resistencia a la tracción, punto de fusión, etc.), la ***temperatura de transición vítrea*** (T_g) es una propiedad física que es única de los polímeros y algunas cerámicas. A bajas temperaturas, los polímeros se comportan de forma muy similar a los sólidos vidriosos, donde el único movimiento viene de las vibraciones moleculares. Conforme se incrementa la temperatura, los polímeros con bajos pesos moleculares se derriten como otros materiales, pero los polímeros de alto peso molecular desarrollan un movimiento cooperativo previo a la fusión. Entre esta temperatura y el punto de fusión, las cadenas de polímeros se doblan y se desenrollan, comportándose como un material chicloso en lugar de un vidrio o un líquido.

En diversas formas, el polímero se puede ver como un resorte conectado a dos postes. Por debajo de la temperatura de transición vítrea, el único movimiento es en el nivel molecular y es imperceptible. Arriba de la temperatura de transición vítrea, alguien estira el resorte, que ahora se dobla y vibra. La explosión que destruyó la nave espacial *Challenger* resultó de un anillo en o de hule que se volvió vidrioso cuando la temperatura del aire cayó por debajo de la temperatura de transición vítrea del polímero. En lugar de formar un

Figura 5-19 Unidad estructural del polibutadieno

Cortesía de James Newell



- Fabricantes: Goodyear, Bayer, Bridgestone
- Hule sintético
- Usado en llantas y bandas de rodamiento para automóviles, camiones y camionetas

Figura 5-20 Unidad estructural del policloropreno

Cortesía de James Newell

- Nombres comerciales: Neoprene, Duprene
- Similar al polibutadieno pero con la adición de cloro mejora la rigidez y la estabilidad
- Usado para los guantes de latex, botas, trajes de baño, adhesivos

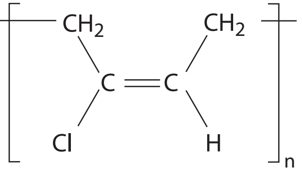


Tabla 5-1 Propiedades físicas de los polímeros comerciales

Polímero	Categoría	T_m(°C)	T_g(°C)	Densidad (g/cm^3)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de tracción (MPa)
PMMA	Acrílico	265-285	105	1.19	55-76	2 400-3 400
PBO	Aramida	n/d	n/d	1.54	5 800	180 000
Nylon 6,6	Nylon	255	n/d	1.14	90	3 400
PET	Poliéster	245-265	80	1.4	172	4 275
LDPE	Poliolefina	110	n/d	0.92	10.3	166
HDPE	Poliolefina	130-137	n/d	0.94-0.97	19-30	800-1 400
PP	Poliolefina	164	−20	0.903	35.5	1 380
Viscosa	Rayón	n/d	n/d	1.5	28-47	9.7
PVDC	HVTP	160	−4	1.17	34.5	517
PS	HVTP	180	74-110	1.04	46	2 890
PVC	HVTP	175	81	1.39	55	2 800
Poliisopreno	Elastómero	40	−63	0.970	17-25	1.3
Polibutadieno	Elastómero	n/d	−110 a −95	1.01	18-30	1.3
Policloropreno	Elastómero	n/d	−45	1.32	25-38	0.52

Valores de Polymer Handbook, 4a ed., *J. Brandrup, E. Immergut y E. Grulke, eds. (Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1999).*

sello firme, el ahora anillo de aire vidrioso permitió que los gases se filtraran y la nave explotara. Se revisa más de cerca la temperatura de la transición del vidrio cuando se examina la cristalinidad en los polímeros.

| ***Agrietamiento*** | Proceso de ruptura de hidrocarburos orgánicos grandes en moléculas más pequeñas.

¿Cómo se forman las cadenas de polímeros?

El petróleo es la principal materia prima para la mayoría de los polímeros. Cuando el petróleo crudo se destila, los valiosos productos del petróleo se retiran y los compuestos menos valiosos con peso molecular más alto se dejan para calentarlos a través de un catalizador. Como resultado, los hidrocarburos más grandes se rompen en moléculas más pequeñas a través de un proceso denominado ***agrietamiento***. Estas moléculas más pequeñas fungen como los bloques de construcción iniciales para los monómeros que se convertirán en polímeros. Uno de los monómeros más comunes, el etileno, también se obtiene del gas natural.

Debido al costo del petróleo crudo y al impacto ambiental de su refinación, se lleva a cabo un esfuerzo significativo para encontrar fuentes alternativas viables comercialmente para los precursores de los polímeros. El maíz, la cebada, la soya y la madera han sido identificados como fuentes renovables de precursores de polímeros, pero la producción comercial a gran escala está actualmente obstaculizada por los altos costos y las bajas cosechas.

Cualquiera que sea la fuente de los materiales precursores, la mayoría de los polímeros están hechos a través de uno o dos esquemas de reacción: ***polimerización por adición*** y ***polimerización por condensación***.

| ***Polimerización por adición*** | Uno de los dos esquemas de reacción más comunes usados para crear polímeros, que involucra tres pasos: iniciación, propagación y terminación. También llamada polimerización de crecimiento de cadena y polimerización de radical libre.

| ***Polimerización por condensación*** | Formación de un polímero que ocurre cuando dos grupos terminales potencialmente reactivos en un polímero reaccionan para formar un nuevo enlace covalente entre las cadenas poliméricas. Esta reacción también forma un subproducto, que típicamente es agua.

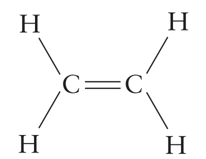


Figura 5-21 Monómero de vinilo (etileno)

5.3 POLIMERIZACIÓN POR ADICIÓN

La polimerización por adición, que también se conoce como *polimerización de radical libre* o *polimerización de crecimiento de cadena*, empieza con un ***monómero de vinilo***, como el que se muestra en la figura 5-21. Los grupos que rodean al carbono de enlace doble pueden ser diferentes, y la identidad del monómero cambia consecuentemente. Si los cuatro átomos son de hidrógeno, el monómero de vinilo es etileno. Si un átomo de hidrógeno se reemplaza con un anillo de benceno, el monómero es estireno. Más de un átomo de hidrógeno se puede reemplazar con otros átomos. Un monómero de vinilo con un átomo de cloro sería un cloruro de vinilo, dos átomos de cloro harían el monómero de vinilideno.

| ***Monómero de vinilo*** | Molécula orgánica de doble enlace usada para iniciar la polimerización por adición.

Sin importar el monómero de vinilo específico, todas las reacciones de polimerización por adición ocurren en tres pasos:

1. Iniciación
2. Propagación
3. Terminación

La figura 5-22 ilustra la reacción completa usando un monómero de estireno. La etapa de ***iniciación*** puede ser inducida por calor, radiación (incluyendo

| ***Iniciación*** | Primer paso en el proceso de polimerización durante el cual un radical libre se forma.

Iniciación

$$HO—OH + Luz \longrightarrow 2HO\bullet$$

El radical libre reacciona con el primer monómero

$$HO\bullet + CH_2═CH_2 \longrightarrow HO—CH_2—CH_2\bullet$$

Propagación (se repite hasta la terminación)

$$HO—[CH_2—CH_2]_m\bullet + CH_2═CH_2 \longrightarrow HO—[CH_2—CH_2]_{m+1}\bullet$$

Propagación (se repite hasta la terminación)

Terminación primaria

$$HO—[CH_2—CH(C_6H_5)]_M\bullet + \bullet OH \longrightarrow HO—[CH_2—CH(C_6H_5)]_M—OH$$

Terminación mutua

$$HO—[CH_2—CH(C_6H_5)]_M\bullet + \bullet[CH_2—CH(C_6H_5)]_N—OH \longrightarrow HO—[CH_2—CH(C_6H_5)]_{M+N}—OH$$

Figura 5-22 Secuencia de reacción para la polimerización por adición del estireno

luz visible) o la adición de un químico (generalmente agua oxigenada). El propósito del iniciador es inducir la formación de un electrón impar altamente reactivo llamado ***radical libre***. Una vez formado, el radical libre ataca el doble enlace, formando un nuevo enlace y transfiriendo el radical libre al final de la cadena. Si consideramos la iniciación química de la polimerización por adición del estireno usando agua oxigenada, la H—O—O—H espontáneamente se descompone en un par de radicales O—H·, capaces de atacar el doble enlace de una molécula de estireno.

Durante la segunda etapa, la ***propagación***, el radical de estireno recientemente formado puede atacar al doble enlace en otra molécula de estireno, nuevamente rompiendo el doble enlace, transfiriendo el radical al final, y agregando una molécula más a la creciente cadena.

El nuevo radical poliestireno puede continuar atacando los dobles enlaces en los monómeros de estireno, cada vez creciendo en longitud por un monómero. El polímero continúa creciendo hasta que reacciona con más monómeros.

La etapa final, la ***terminación***, ocurre cuando dos radicales libres reaccionan entre sí y terminan la reacción de polimerización. Dos tipos distintos de radicales libres están presentes en el sistema: las cadenas crecientes de poliestireno y los radicales iniciadores que no han reaccionado. Cuando un radical polímero creciente con M unidades de monómero agregadas reacciona con otro radical creciente con N unidades de monómero, ocurre la ***terminación mutua***, resultando en una cadena polímerica completa con M + N unidades.

Alternativamente, el radical de poliestireno creciente de longitud M se puede combinar con un radical libre primario a partir del agua oxigenada resultando en la ***terminación primaria***. En este caso, un polímero terminado resulta en unidades de monómero M.

Se deben considerar tres puntos acerca de la polimerización por adición:

1. El radical libre puede formar ya sea el lado sustituido o no sustituido del monómero de vinilo (excepto cuando el etileno es el monómero). De tal manera, el nuevo monómero se puede agregar cabeza a cabeza exclusivamente, cabeza a cola exclusivamente, o una mezcla de los dos, dependiendo de las estabilidades relativas de los radicales libres.

2. Aunque el polímero puede tener miles (o millones) de unidades de monómeros idénticos agregados, solo habrá dos ***grupos terminales***. En este caso, ambos serán grupos —OH. Los grupos terminales son poco significativos en las propiedades mecánicas de la mayoría de los polímeros pero se pueden utilizar para determinar el número de cadenas formadas a través de la valoración química.

3. Muchas cadenas diferentes son reactivas al mismo tiempo, y ya sea que reaccionen con otro monómero vinílico o con un radical libre es probabilístico. Por lo tanto, se formará una distribución de longitudes de cadenas, como se muestra en la figura 5-23. El controlar esa distribución es un gran reto para los científicos e ingenieros de polímeros.

| ***Radical libre*** |
Molécula que contiene un electrón no pareado altamente reactivo.

| ***Propagación*** |
Segunda etapa del proceso de polimerización durante la cual la cadena de polímeros empieza a crecer como monómeros agregados a la cadena.

| ***Terminación*** |
Etapa final en el proceso de polimerización que causa el alargamiento de la cadena del polímero para que llegue a un final.

| ***Terminación mutua*** |
Uno de los dos tipos diferentes de terminación en el proceso de polimerización. Durante este tipo de terminación, los radicales libres de dos cadenas de polímeros diferentes unidas al final del proceso de propagación.

| ***Terminación primaria*** |
Última etapa en el proceso de polimerización que ocurre cuando el radical libre de una cadena polimérica se une con el radical libre a un grupo final.

| ***Grupos terminales*** |
Dos sustituyentes encontrados en ambos extremos de una cadena polimérica que tienen poco a nada de efecto en las propiedades mecánicas.

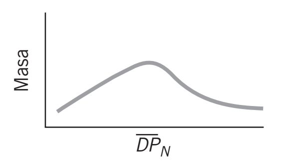


Figura 5-23 Distribución de las longitudes de cadena a partir de la polimerización por adición

5.4 POLIMERIZACIÓN POR CONDENSACIÓN

La alternativa para la polimerización por adición es la polimerización por condensación, que a veces es referida como ***polimerización por crecimiento en etapas***. A diferencia de la polimerización por adición, la polimerización por condensación no requiere etapas secuenciales o cualquier iniciación. En la condensación, los grupos funcionales potencialmente reactivos en los finales de las moléculas reaccionan. Un nuevo enlace covalente se forma entre los grupos funcionales, y una molécula pequeña (usualmente agua) se

| ***Polimerización por crecimiento en etapas*** |
Formación de un polímero que ocurre cuando dos grupos terminales potencialmente reactivos en un polímero reaccionan para formar un nuevo enlace covalente entre las cadenas polímericas. Esta reacción también forma un subproducto, que es típicamente agua. También conocida como polimerización por condensación.

| Grupos funcionales | Arreglos específicos de átomos que causan compuestos orgánicos para comportarse en formas predecibles.

forma como un subproducto. Los ***grupos funcionales*** son arreglos específicos de átomos que causan un compuesto orgánico para comportarse en formas predecibles. La mayoría de las reacciones químicas ocurren en grupos funcionales. La figura 5-24 muestra los grupos funcionales encontrados frecuentemente en los polímeros. Las polimerizaciones por condensación más comunes ocurren entre un ácido y un alcohol, como la reacción entre el ácido tereftálico y el etilén glicol para formar PET y agua, como se muestra en la figura 5-25.

El polímero todavía contiene grupos funcionales potencialmente activos en cada uno de los finales que son capaces de reaccionar con otro ácido, alcohol, o con otra cadena creciente. El polímero continúa creciendo hasta que finalmente proporciona un polímero de la forma

$$\mathrm{H}\left[\mathrm{O}-\overset{\mathrm{O}}{\overset{\|}{\mathrm{C}}}-\mathrm{C_6H_4}-\overset{\mathrm{O}}{\overset{\|}{\mathrm{C}}}-\mathrm{O}-\mathrm{CH_2CH_2}-\mathrm{O}\right]_{\mathrm{N}}\mathrm{H}$$

| Homopolímero | Polímero que se hace a partir de una sola unidad de repetición.

| Templado | Terminación de una reacción de polimerización por condensación mediante la adición de un material con un sólo grupo funcional.

junto con 2(n − 1) moléculas de agua. El PET también se llama ***homopolímero*** porque tiene una sola unidad de repetición. El grupo funcional de glicol reaccionará sólo con un ácido, mientras que el grupo funcional del ácido reaccionará sólo con un alcohol. Esto asegura que el monómero siempre agregue A-B-A-B-A-B. Teóricamente, la polimerización por condensación puede continuar hasta que todo monómero disponible haya reaccionado para formar una sola cadena polimérica gigante. En realidad, la reacción de la polimerización alcanza algún equilibrio y, conforme la cadena se hace más grande, el impedimento esteárico inhibe el crecimiento adicional. Nuevamente, una distribución de longitudes de cadena resultará del proceso de polimerización. En algunos casos la reacción puede concluir mediante la adición de un material con sólo un grupo funcional. Esta terminación se llama ***templado*** de la reacción. Adicionalmente a los ácidos y los alcoholes, los ácidos y aminos también experimentan polimerizaciones por condensación. Por ejemplo, el Nylon 6,6 está formado por la reacción de condensación de ácido adípico y diamina de hexametileno.

Nombre	*Estructura*	*Nombre*	*Estructura*
Ácido	$-\overset{\mathrm{O}}{\overset{\|}{\mathrm{C}}}-\mathrm{O}-\mathrm{H}$	Epóxico	$-\mathrm{C}\overset{\mathrm{O}}{-}\mathrm{C}-$ (anillo C–O–C)
Alcohol	$-\mathrm{C}-\mathrm{O}-\mathrm{H}$	Éster	$-\overset{\mathrm{O}}{\overset{\|}{\mathrm{C}}}-\mathrm{O}-\mathrm{C}-$
Aldehído	$-\overset{\mathrm{O}}{\overset{\|}{\mathrm{C}}}-\mathrm{H}$	Éter	$-\mathrm{C}-\mathrm{O}-\mathrm{C}-$
Amida	$-\overset{\mathrm{O}}{\overset{\|}{\mathrm{C}}}-\overset{\mathrm{H}}{\overset{\mid}{\mathrm{N}}}-$	Isocianato	$-\mathrm{N}{=}\mathrm{C}{=}\mathrm{O}$
Amina	$-\overset{\mathrm{H}}{\overset{\mid}{\mathrm{N}}}-\mathrm{H}$	Acetona	$-\overset{\mathrm{O}}{\overset{\|}{\mathrm{C}}}-$
Aromático	$-\mathrm{C_6H_5}$ (anillo bencénico)		

Figura 5-24 Grupos funcionales que se encuentran en los polímeros

$$HO-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-C_6H_4-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-OH \quad HO-CH_2CH_2-OH$$

Ácido tereftálico — Etilén glicol

Produce

$$HO-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-C_6H_4-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-O-CH_2CH_2-OH + H_2O$$

Tereftalato de polietileno (PET) y agua

Figura 5-25 Polimerización por condensación del PET

5.5 IMPORTANCIA DE LAS DISTRIBUCIONES DEL PESO MOLECULAR

Debido a que ambos tipos de reacciones de polimerización resultan en cadenas múltiples de longitudes diferentes, cada cadena tendrá un peso molecular muy diferente. Cualquier peso molecular usado para representar una muestra de polímero tendrá que representar un promedio de amplio rango de longitudes de cadena. Para evitar la confusión, la ***masa molecular relativa (RMM)*** se define como

$$RMM = \frac{m}{1.0001}, \tag{5.1}$$

donde m es la masa de cualquier cadena polimérica dada y 1.0001 es 1/12 de la masa de un átomo de carbono 12. Finalmente, la RMM es solo la definición del peso molecular usado para los materiales no poliméricos tradicionales. Considere una cadena de polietileno con $\overline{DPn} = 10\,000$. La unidad estructural contiene dos átomos de carbono, cada uno conuna masa molecular de 12, y cuatro átomos de hidrógeno, cada uno con un peso molecular de 1. De tal manera que, la masa molecular relativa de la cadena está dada por

$$RMM = 10\,000 * [(2 * 12) + (4 * 1)] = 280\,000$$

Los 280 000 aplican sólo a esa sola cadena específica. Las cadenas más grandes en el mismo lote tendrán una RMM más alta, mientras que cadenas más cortas tendrán una RMM más pequeña. La resistencia a la tracción y otras propiedades mecánicas varían con el peso molecular. Por ejemplo, la figura 5-26 muestra la relación entre la resistencia a la tracción y el peso molecular para el polietileno.

Suponga que la RMM fue trazada contra la masa para una muestra dada, como se muestra en la figura 5-27. M_i representa la masa molecular de una fracción dada (i). El peso de la i-ésima fracción (W_i) está dada por la ecuación

$$W_i = n_i M_i, \tag{5.2}$$

donde n_i representa el número de moléculas en la i-ésima fracción. El peso total (W) de las cadenas poliméricas se define como

$$W = \sum_{i=1}^{n} W_i. \tag{5.3}$$

| ***Masa molecular relativa (RMM)*** |
Término usado para representar el peso molecular promedio de una muestra que contiene un amplio rango de longitudes de cadenas poliméricas. Este término se usa para evitar la confusión entre el peso molecular promedio en número y el peso molecular promedio en peso.

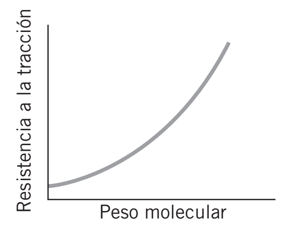


Figura 5-26 Relación entre la resistencia a la tracción y el peso molecular para el polietileno.

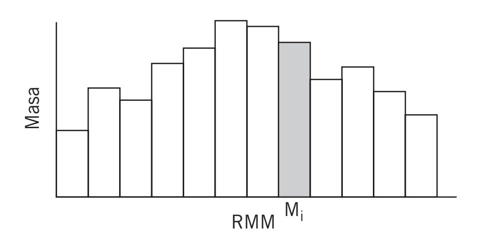


Figura 5-27 Masa contra RMM para un polímero hipotético.

| *Peso molecular promedio en número* |
Forma del peso molecular de una muestra de cadenas poliméricas determinadas mediante la división de la masa del espécimen entre el número total de moles presentes.

| *Peso molecular promedio en peso* |
Un método de expresar el peso molecular de una muestra de polímeros con promedio basado en el peso. Este método es más útil cuando las moléculas grandes en la muestra dominan el comportamiento de la muestra.

Una muestra que contiene 10 moles de cadenas de polímeros con una masa molecular relativa de 500 tendría un peso de 5 000 g:

$$W_i = 10\ mol * 500\ g/mol = 5\,000\ \text{g}.$$

La habilidad para distinguir entre el número de moléculas en una fracción dada y la masa de las moléculas en una fracción dada ofrece la oportunidad de definir diferentes pesos moleculares promedio para el polímero. El ***peso molecular promedio en número*** ($\overline{M}_n$) es el promedio más sencillo y más directo. $\overline{M}_n$ se obtiene al dividir la masa del espécimen entre el número total de moles presentes:

$$\overline{Mn} = \frac{\Sigma n_i M_i}{\Sigma n_i} = \frac{\Sigma W_i}{\Sigma n_i} = \frac{W}{\Sigma n_i} \tag{5.4}$$

Al usar este promedio, todas las moléculas contribuyen igualmente al promedio general. Las propiedades que dependen de un número total de moléculas, sin importar su tamaño, se correlacionan bien con el número de peso molecular promedio.

El ***peso molecular promedio en peso*** ($\overline{M}_w$) se normaliza con base en el peso de las fracciones individuales en lugar de solo el número de moléculas. Como resultado, las cadenas grandes tienen un impacto mayor que las cadenas pequeñas. El peso molecular promedio en peso se define como

$$\overline{M}_W = \frac{\Sigma W_i M_i}{\Sigma W_i} = \frac{\Sigma W_i M_i}{W} = \frac{\Sigma n_i M_i}{\Sigma n_i M_i^2} \tag{5.5}$$

$\overline{M}_w$ es un promedio más adecuado cuando las moléculas grandes dominan el comportamiento, como la viscosidad y la tenacidad. El término M_i^2 en el numerador de la ecuación 5.5 hace que las moléculas grandes sean muy importantes. La diferencia entre los dos promedios se hace más claro en el ejemplo 5-1.

El promedio en número y los pesos moleculares promedio en peso ignoran el efecto insignificante de los dos grupos terminales por cadena. Dos puntos entre estos dos pesos moleculares deben considerarse:

1. $\overline{M}_W$ es siempre más grande que $\overline{M}_n$ para los polímeros reales.
2. La razón de $\overline{M}_W/\overline{M}_n$ proporciona información acerca de la holgura de la distribución de los pesos moleculares.

En general, las cadenas poliméricas con pesos moleculares más altos serán más fuertes, más resistentes al arrastre y más tenaces. Las propiedades físicas de los polímeros depende de la constitución, configuración y conformación de las cadenas, que son los tópicos de las siguientes secciones.

Ejemplo 5-1

Considere una mezcla hecha por la adición de 1 gramo de C_5H_{12} a 1 gramo de cera de parafina grande, $C_{100}H_{202}$. Determinar el promedio en número y los pesos moleculares promedio en peso para la mezcla.

SOLUCIÓN

La RMM para C_5H_{12} es $(5 * 12) + (12 * 1) = 72$ g/mol. Ya que se proporciona 1 gramo de C_5H_{12}, se puede determinar el número de moles de C_5H_{12} al dividir entre la RMM.

$$1 \text{ g } C_5H_{12}/72\text{g/mol} = 1.39 \times 10^{-2}\text{mol de } C_5H_{12}.$$

Similarmente, la RMM para $C_{100}H_{202}$ es

$$(100 * 12) + (202 * 1) = 1\,402 \text{ g/mol}$$

y

$$1 \text{ g } C_{100}H_{202}/1\,402 \text{ g/mol} = 7.13 \times 10^{-4} \text{ mol of } C_{100}H_{202}$$

De la ecuación 5.4,

$$\overline{M}_n = \frac{W}{\Sigma n_i} = \frac{1\ g + 1\ g}{(1.39 \times 10^{-2} \text{ mol}) + (7.13 \times 10^{-4} \text{ mol})}$$
$$= 143 \text{ g/mol}$$

De la ecuación 5.5,

$$\overline{M}_W = \frac{\Sigma W_i M_i}{\Sigma W_i} = \frac{(1 \text{ g})(72 \text{ g mol}) + (1 \text{ g})(1\,402 \text{ g mol})}{1 \text{ g} + 1 \text{ g}}$$
$$= 737 \text{ g/mol}$$

Debido a que muchos más moles del hidrocarburo más pequeño estuvieron presentes, el peso molecular promedio en número es más cercano a la RMM de C_5H_{12}. Sin embargo, la masa de $C_{100}H_{202}$ fue mucho más grande, así que el peso molecular promedio de la masa terminaría siendo cinco veces más alto que el promedio en número.

| *Constitución* |
Todo lo relacionado con los enlaces en los polímeros incluyendo los enlaces primario y secundario, la ramificación, la formación de redes y los grupos terminales.

| *Enlace primario* |
Enlace covalente de el esqueleto del polímero y los grupos laterales.

¿Qué influye en las propiedades de los polímeros?

5.6 CONSTITUCIÓN

La ***constitución*** incluye todo lo relacionado con los enlaces, incluyendo los enlaces primario y secundario, la ramificación, la formación de redes y los grupos terminales. El ***enlace primario*** forma el esqueleto del polímero, incluyendo los grupos laterales, y siempre es covalente. Todos los enlaces deben estar saturados, así que todos los carbonos de la cadena principal deben tener cuatro enlaces, el nitrógeno tres enlaces y el oxígeno dos enlaces. La ***funcionalidad*** se refiere al número de diferentes enlaces que una molécula ha

| *Funcionalidad* |
Número de enlaces que una molécula ha formado.

| *Enlace secundario* |
Enlace altamente dependiente de la distancia entre cadenas de polímeros adyacentes; usualmente incluye el enlace de hidrógeno, los dipolos y las fuerzas de van der Waals.

formado. Todos los miembros del esqueleto deben tener una funcionalidad de por lo menos 2. El ***enlace secundario*** se refiere al enlace entre cadenas poliméricas adyacentes. En la mayoría de los casos el enlace secundario resulta de una combinación de tres fuentes:

1. Fuerzas de Van der Waals
2. Atracción dipolar
3. Enlace de hidrógeno

Como lo muestra la tabla 5-2, todo enlace secundario es altamente dependiente de la distancia. Las cadenas deben estar juntas para efectos de enlace secundario a la materia. En promedio, el enlace de hidrógeno (si estuviera presente) suele ser más fuerte que las fuerzas de Van der Waals.

Aunque los enlaces primarios son sustancialmente más fuertes que los enlaces secundarios, los enlaces secundarios juegan un rol clave en las propiedades mecánicas de los polímeros. Aunque los enlaces secundarios individuales son débiles, el enlace secundario es una función aditiva del traslape de la cadena. Para mover la cadena todos los enlaces secundarios se deben romper. Si cada unidad estructural recibe 8.4 kJ/mol del enlace secundario de las fuerzas de Van der Waals, y 100 unidades estructurales se encuentran suficientemente cercanas a las cadenas vecinas como para experimentar enlace secundario, entonces serán necesarios 840 kJ/mol de energía para sobreponerse a los enlaces secundarios. La naturaleza aditiva de los enlaces secundarios explica el por qué las cadenas de polímeros de alto peso molecular son más fuertes que las cadenas de bajo peso molecular del mismo material. Las cadenas más largas tienen mayor oportunidad de formar enredamientos y desarrollar la regularidad espacial necesaria para el enlace secundario como se ilustra en la figura 5-28.

La ramificación, como se explicó en las poliolefinas, involucra a otra cadena de polímeros que toma el lugar de un grupo lateral a lo largo de la cadena principal. El átomo en el cual se conectan las dos cadenas se conoce como *punto de ramificación*, como se muestra en la figura 5-29. Las ramificaciones son diferentes a los grupos laterales porque son constitucionalmente idénticas a la cadena principal. No hay ninguna forma de distinguir la cadena principal de la ramificación, aunque la cadena más corta generalmente es designada como la ramificación. La presencia de ramificaciones reduce la posibilidad de formar enredamientos y desarrollar enlaces secundarios significativos. Como resultado, los polímeros altamente ramificados son menos fuertes y menos tenaces, pero las ramificaciones hacen que el polímero sea más fácil de derretir, más susceptible a los solventes y más degradable.

Tabla 5-2 Energías de enlaces y longitudes para enlaces poliméricos comunes

Tipo de enlace	*Clasificación del enlace*	*Longitud del enlace (nm)*	*Energía de enlace (kJ/mol)*
C—C	covalente-primario	0.154	347
C—H	covalente-primario	0.110	414
C—N	covalente-primario	0.147	305
C—O	covalente-primario	0.146	360
C—Cl	covalente-primario	0.177	339
Enlace de hidrógeno	secundario	0.24-0.32	12.5-29
Van der Waals y dipolar	secundario	0.3-0.5	8.4 para Van der Waals sólo a 42 para altamente polar

Figura 5-28 Interacciones de Van der Waals en cadenas largas

Punto de ramificación

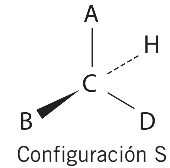
Figura 5-29 Punto de ramificación de un polímero

5.7 CONFIGURACIÓN

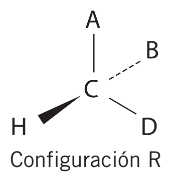
La ***configuración*** es el arreglo espacial de los sustituyentes alrededor de la cadena principal de átomos de carbono que sólo puede alterarse al romperse los enlaces. Un átomo de carbono es capaz de configuraciones múltiples si, y sólo si, es asimétrico (por ejemplo, tiene cuatro sustityentes diferentes). Cualquier átomo de carbono con enlaces dobles o sustituyentes repetidos (por ejemplo, dos átomos de hidrógeno) no es asimétrico y no puede tener configuraciones múltiples. La figura 5-30 muestra un carbono asimétrico en dos configuraciones distintas. Observe que las moléculas son imágenes reflejadas y que ninguna rotación las hará idénticas.

| ***Configuración*** |
Arreglo espacial de sustituyentes alrededor de la cadena principal de átomos de carbono que solamente puede alterarse al romperse los enlaces.

Figura 5-30 Átomo de carbono asimétrico en dos configuraciones distintas



Configuración S



Configuración R

Las reglas existen para distinguir entre las imágenes reflejadas en los polímeros para ayudar a identificar qué molécula está presente. Se comienza con el átomo de carbono de la cadena principal al centro,

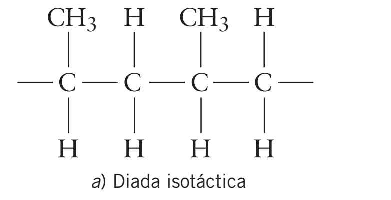
1. Colocar el grupo lateral con el número atómico total más alto sobresaliendo. Si dos grupos tienen el mismo número atómico, el grupo más grande físicamente tiene prioridad.
2. Marcar el rango de los grupos que restan en orden, desde el número atómico más alto hasta el más bajo.
3. Si el moverse desde el número atómico más alto al más bajo requiere un movimiento en el sentido de las manecillas del reloj, el carbono se marca (R). Si el movimiento es al contrario de las manecillas del reloj, el carbono se marca (S).

Considere los siguientes dos segmentos de cadenas de polipropileno. Pueden parecer idénticos a primera vista, pero no lo son. Las configuraciones relativas de los carbonos asimétricos son diferentes, y no hay manera de que el segundo segmento pueda rotar para ser idéntico a la perfección con el primero. A la configuración relativa de carbonos asimétricos adyacentes se le llama ***tacticidad***.

| *Tacticidad* | Configuración relativa de carbonos adyacentes asimétricos.

Si se observa una proyección plana de los dos segmentos, el grupo metilo está en el mismo lado de la molécula *a*) y en lados opuestos de la molécula *b*). Los dos átomos de carbono en la molécula *a*) son referidos como ***diada isotáctica;*** los dos carbonos en la molécula *b*) son una ***diada sindiotáctica***.

| *Diada isotáctica* | Configuración de un sustituyente en un polímero, en la que el sustituyente está localizado en el mismo lado de la cadena de polímeros en todas las unidades repetitivas.



a) Diada isotáctica

CH_3 H H H
C C C C
H H CH_3 H

b) Diada sindiotáctica

| *Diada sindiotáctica* | Configuración de un polímero en el que el sustituyente se localiza en los lados opuestos de la molécula en cada unidad repetitiva.

| *Atáctico* | Término utilizado para describir un polímero que contiene números significativos de diadas sindiotácticas e isotácticas.

Un polímero puede tener todas las diadas sindiotácticas, todas las diadas isotácticas, o una mezcla de cada una. Si ambas diadas sindiotácticas e isotácticas se encuentran presentes en números significativos, se dice que el polímero es ***atáctico***. Algunas reacciones químicas que involucran polímeros son afectadas por las distintas nubes de electrones asociadas con configuraciones sindiotácticas e isotácticas, pero la propiedad más directamente afectada por la tacticidad es la cristalinidad.

A diferencia de los metales o cerámicas, los polímeros no forman redes de Bravais. Sin embargo, es energéticamente favorable para algunos polímeros el formar regiones de orden bidimensional o tridimensional. Para formar regiones cristalinas, los polímeros necesitan una estructura regular. Las alineaciones isotácticas y sindiotácticas son regulares, pero una cadena atáctica no tiene una

Ejemplo 5-2

Determinar si existen algunos carbonos asimétricos en los polímeros mostrados. Si es el caso, determinar si son carbonos (R) o (S). (*Nota:* DP_{n1} y DP_{n2} representan el resto de la cadena de polímero en esa dirección.)

a) $DP_{n_1}—C(H)(H)—DP_{n_2}$

b) $DP_{n_1}—C(=O)—DP_{n_2}$

c) $—[C(=O)—C_6H_4—C(=O)OCH_2CH_2O]—$

d) $DP_{n_1}—C(CH_3)(H)—DP_{n_2}$ $DP_{n_1} > DP_{n_2}$

e) $DP_{n_1}—C(CH_3)(H)—DP_{n_2}$ $DP_{n_1} = DP_{n_2}$

SOLUCIÓN

a) No, no existen carbonos asimétricos. Los dos átomos de hidrógeno son idénticos, por lo que el carbono sólo tiene tres sustituyentes únicos. No es asimétrico.
b) No, no hay carbonos asimétricos. El enlace doble deja sólo tres sustituyentes.
c) No, no hay carbonos asimétricos.
d) Con cuatro grupos diferentes de sustituyentes, el carbono es asimétrico. DP_{n1} es el sustituyente más grande. $DP_{n2} > CH3 > H$, por lo que se tendría que viajar en contra de las manecillas del reloj para ir en orden. Por lo tanto, el átomo de carbono es (S).
e) Si $DPn^1 = DPn^2$, el carbono tiene dos sustituyentes idénticos y no es asimétrico.

regularidad espacial. Como resultado, las cadenas de polipropileno isotácticas y sindiotácticas se cristalizarán, pero las cadenas atácticas no lo harán. Los grupos laterales voluminosos restringen la formación de cristalitas en los polímeros. El anillo aromático en el poliestireno hace difícil que se cristalice. Sin embargo, los enlaces de hidrógeno entre cadenas ayudan a fijar los polímeros en su lugar y promueven la cristalinidad. En el mejor de los casos, los polímeros son semicristalinos.

La cristalinidad en los polímeros es más complicada que en los metales. En muchas maneras, las regiones cristalinas son como defectos en un continuo amorfo, como se muestra en la figura 5-31. Las partes de la cadena forman estas regiones ordenadas, las que serían como piezas de fruta suspendidas en gelatina Jell-O®. Estas pequeñas regiones de orden son efectivamente cristalitas en polímero.

A diferencia de los cristales claramente definidos en los metales y cerámicas, los polímeros no tienen redes a gran escala. Al contrario, hay pequeñas regiones de orden que pueden ser de un ancho de tan sólo unas cuantas cadenas. Sin ninguna estructura de red clara, habría que preguntar: ¿Qué tan cristalina necesita ser para contar? La respuesta es que depende de cómo se mida la cristalinidad, ya que distintas técnicas analíticas proporcionarán estimados algo diferentes para la cristalinidad del polímero.

Como se comentó en el capítulo 2, la difracción de rayos X es una técnica excepcional para el estudio de los sistemas de cristal. Sin embargo, se necesitan alrededor de 10 planos de capas para generar el reforzamiento positivo necesario para obtener difracción coherente, lo cual implica que cualquier cristalita que su grosor sea menor a 10 planos de capas será totalmente ignorada por la difracción de rayos X.

Un método alternativo para calcular la cristalinidad es aplicar un regla de mezclado simple basada en las densidades. La cristalinidad (α) podría calcularse como una proporción de las diferencias entre la muestra y un polímero amorfo (*a*) a la de un cristal perfecto (*c*) a un polímero amorfo:

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_a}{\rho_c - \rho_a}. \qquad (5.6)$$

El valor de ρ_a se obtiene de los estudios de templado, mientras que el valor de ρ_c se obtiene de la difracción de rayos X en un cristal único puro. Esta técnica contará cualquier orden, aun cuando suceda que dos segmentos pequeños de cadena están cerca entre sí, como cristalina. Entonces, el método de densidad relativo sobreestima la cristalinidad.

Un tercer procedimiento involucra la calorimetría. La energía necesaria para calentar la muestra hasta su punto de fusión se registra y se compara con la necesaria para derretir una muestra de cristal puro. La cristalinidad (α) se calcula como:

$$\alpha = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{m,c}}, \qquad (5.7)$$

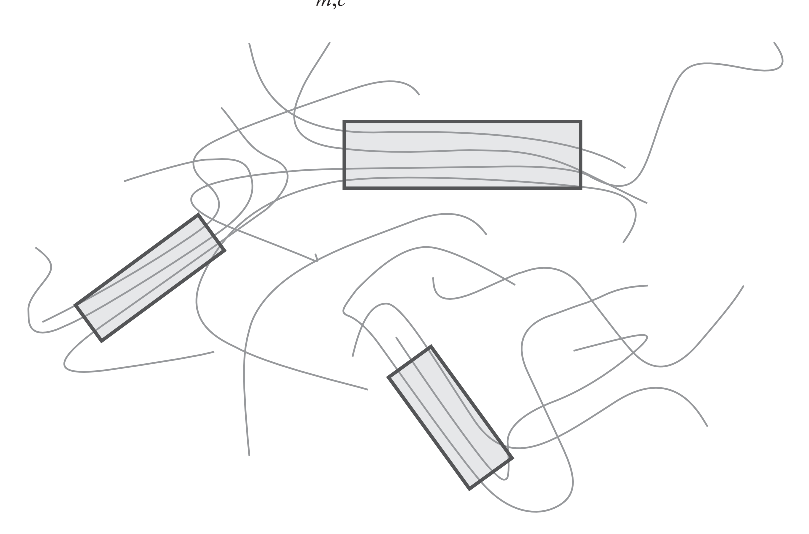


Figura 5-31 Esquema de cristalinidad del polímero

donde ΔH_m es la entalpía de fusión de la muestra y $\Delta H_{m,c}$ es la entalpía de fusión de una muestra de cristal puro. Esta técnica funcionaría, pero más de la muestra se cristaliza durante el proceso mientras que su temperatura aumenta entre la temperatura de transición vítrea y el punto de fusión. La técnica de ensayo por sí sola altera la muestra y, como resultado, sobreestimará la cristalinidad.

La variación en el cálculo entre las técnicas puede ser sustancial. El cálculo de cristalinidad en una muestra de polietileno trefilada que tiende a formar pequeñas cristalitas puede ser tan baja como 2% desde la difracción de rayos X y tan alta como 20% desde las densidades relativas. No hay una sola respuesta a qué tan cristalina es cristalina en los polímeros.

5.8 CONFORMACIÓN

La ***conformación*** se refiere a la geometría espacial de la cadena principal y los sustituyentes que se puedan cambiar mediante rotación y movimiento de flexión. La conformación es una función de energética molecular. Las fuerzas de atracción (energías de enlace) son favorables y harán que las moléculas quieran estar más cerca una de la otra. Las fuerzas de repulsión son desfavorables y harán que las moléculas se separen. Cinco fuerzas totales se combinan para influir en la conformación:

| *Conformación* |
Se refiere a la geometría espacial de la cadena principal y los sustituyentes que se puedan cambiar mediante rotación y movimiento de flexión.

$$E_{Tot} = E_B + E_{ee} + E_{nn} + E_{kin} + E_{ne}, \tag{5.8}$$

En donde E_{Tot} es la energía total, E_B es la energía de enlace (de atracción), E_{ee} es la energía de la interacción de las nubes de electrones (de repulsión), E_{nn} es la energía de la interacción entre núcleos (de repulsión), E_{kin} es un término de energía cinética de repulsión asociado con el enlace y E_{ne} es la energía de la interacción entre el núcleo y la nube de electrones (de atracción).

Debido a que las nubes de electrones de moléculas adyacentes entran en mucho más contacto que los núcleos, E_{ee} es mucho más grande que E_{nn}. Aunque la energía de enlace (E_B) con frecuencia es bastante alta, es independiente de la geometría espacial, así es que la conformación está realmente controlada por tres términos: E_{ee}, E_{kin}, y E_{ne}. Si las fuerzas de repulsión son más grandes que las fuerzas de atracción, la geometría más estable tendrá sustituyentes tan alejados como sea posible. Las fuerzas de repulsión son casi siempre más grandes que las fuerzas de atracción, excepto cuando la presencia de heteroátomos en los grupos sustituyentes permite el enlace de hidrógeno u otra interacción significativa entre los grupos adyacentes.

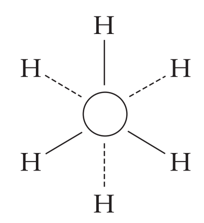


Figura 5-32 Molécula de etano en la conformación (trans) más estable

Considere una molécula de etano (C_2H_6) vista por debajo de la cadena de carbono con los seis átomos de hidrógeno libres para girar. La suma de las fuerzas de atracción para el etano es de 19.7 kcal/mol mientras que las fuerzas de repulsión dan un total de 22.4 kcal/mol. Debido a que las fuerzas de repulsión son más fuertes que las fuerzas de atracción, la conformación más estable para el etano tendría todos los átomos de hidrógeno separados 60 grados, como se muestra en la figura 5-32.

Considere la rotación de los tres átomos de hidrógeno adjuntos al primer átomo de carbono. A una rotación de 0º, los átomos de hidrógeno en los átomos de carbono adyacentes están completamente alineados. Debido a que las fuerzas de repulsión son más fuertes que las de atracción, esta alineación se encuentra en un estado de energía más alto y es menos favorable. Al tiempo que los átomos de hidrógeno empiezan a girar, hay menor interacción, y las energías se hacen más favorables hasta que están tan separadas como sea posible a 60°. Más allá de los 60º, las nubes de electrones alrededor del hidrógeno

Figura 5-33 Estados de energía asociados con la conformación del etano

comienzan a interactuar otra vez. Debido a que todos los sustituyentes son los mismos, las energías hacen ciclos simétricamente a través de la rotación total de 360º, como se muestra en la figura 5-33.

El tema de la conformación se hace más importante cuando los sustituyentes son diferentes. En vez de etano, considere una molécula de butano (C_4H_{10}). Otra vez, las fuerzas de repulsión son más grandes que las fuerzas de atracción, pero esta vez cada uno de los dos átomos de carbono centrales tiene adjunto un grupo metilo, como se muestra en la tabla 5-3.

Tabla 5-3 Impacto de la conformación en el nivel de energía

Rotación	*Proyección de Newman*	*Diagrama de energía*	*Comentarios*
0º (360º) (cis, eclipsada)	CH_3, CH_3, H, H, H, H	A, C, E, A, B, D, F; Energía; 1, 60, 120, 180, 240, 300, 360; Ángulo de torsión (grados)	El estado menos favorable de la energía (energía más alta), grupos grandes sustituyentes de metilo directamente se alinean.
60º (trans, alternada)	CH_3, H, CH_3, H, H, H	A, C, E, A, B, D, F; Energía; 1, 60, 120, 180, 240, 300, 360; Ángulo de torsión (grados)	Alguna interacción entre las nubes de electrones de los grupos metilo, pero también hay más estabilidad que en la eclipsada.

Tabla 5-3 (*continuación*)

Rotación	*Proyección de Newman*	*Diagrama de energía*	*Comentarios*
120° (cis, sesgada)			La nube de electrón del grupo —CH3 comienza a interactuar con la nube de electrón de los átomos de hidrógenos sustituyentes.
180° (trans, anti)			Estado óptimo de energía, los grupos metilo están tan separados como sea posible.
240° (cis, sesgada)			Igual a 120°.
300° (trans, alternada)			Igual a 60°.

El estado menos favorable de energía para esta molécula sucede en la ***conformación eclipsada*** o conformación cis cuando los grandes grupos sustituyentes de metilo están alineados directamente. La cercanía de los grandes grupos resulta en una repulsión sustancial. El estado de la energía mejora al tiempo que el grupo metilo comienza a rotar hasta que alcanza la desviación de 60º. En este punto, aún existe alguna interacción entre las nubes de electrones de los grupos metilo, pero también hay más estabilidad. La desviación de 60º entre los grupos más grandes se llama ***conformación alternada***. Mientras la rotación continúa, la nube de electrones del grupo metilo comienza a interactuar con la nube de electrones del grupo de átomos de hidrógeno sustituyentes, resultando en energías más altas y menor estabilidad. Cuando la rotación alcanza los 120º, el grupo metilo se encuentra en su contacto más cercano con el hidrógeno, y la

| ***Conformación eclipsada*** |
Sucede cuando los sustituyentes están directamente alineados, provocando la repulsión sustancial entre los sustituyentes y una conformación desfavorable. También se llama conformación cis.

| ***Conformación alternada*** |
Conformación que sucede cuando los sustituyentes más grandes de una molécula están desviados 60 grados.

| *Conformación sesgada* |
Arreglo de los sustituyentes más grandes en donde son desviados 120°.

| *Conformación trans* |
Conformación en la que los sustituyentes más grandes son desviados 180°. Esta conformación es típicamente la más favorable.

| *Aditivos* |
Moléculas añadidas a un polímero para reforzar o alterar propiedades específicas o moléculas añadidas al concreto para propósitos distintos a la alteración de una propiedad específica.

molécula se dice que está en una ***conformación sesgada.*** El estado de energía es significativamente más alto que en la conformación alternada pero menos alto que en la conformación eclipsada, debido a que la nube de electrones del hidrógeno es más pequeña que la del otro grupo metilo. Mientras continúa la rotación, el grupo metilo se mueve más lejos del hidrógeno, mejorando el estado de energía. Cuando la rotación alcanza los 180º de desviación, se alcanza la ***conformación trans***, el estado de energía óptimo. Los grupos metilo se encuentran tan alejados como sea posible, y la distancia entre el grupo metilo y los átomos de hidrógeno adyacentes también son maximizados. Cualquier otra rotación resultaría en el pasar otra vez a través de las conformaciones sesgada y alternada para llegar otra vez a la eclipsada a 360º. Como resultado, los polímeros son más propensos a estar en su conformación trans. Se requiere energía para rotar sobre la barrera de energía hacia un estado sesgado o alternado menos favorable. Los grupos de sustituyentes más grandes tienen una barrera de energía más grande a la rotación.

5.9 ADITIVOS

Los polímeros comerciales frecuentemente son mezclados con ***aditivos*** para aumentar o alterar propiedades específicas. Los plastificadores, rellenos, agentes colorantes y estabilizadores son los aditivos más comunes y cada tipo sirve para un propósito muy diferente.

| *Plastificadores* |
Aditivos que provocan hinchazón, lo que permite a las cadenas de polímeros deslizarse delante de otra más fácilmente, haciendo al polímero más suave y más flexible. También se utilizan para reducir la viscosidad de la pasta de cemento para hacer que el concreto fluya más fácil hacia su forma final.

| *Rellenos* |
Aditivos cuyo propósito principal es reducir el costo del producto final.

| *Agentes colorantes* |
Pigmentos o colorantes que cambian la manera en que la luz es absorbida o reflejada por un polímero.

| *Colorantes* |
Aditivos disueltos directamente en el polímero, causando que el polímero cambie de color.

| *Pigmentos* |
Agentes colorantes que no se disuelven en el polímero.

| *Estabilizadores* |
Aditivos que mejoran la resistencia de un polímero a las variables que pueden causar que los enlaces se rompan, como el calor y la luz.

Los ***plastificadores*** son pequeñas moléculas capaces de disolver cadenas de polímeros. Cuando se añaden al polímero en pequeñas cantidades, las moléculas se posicionan entre las cadenas y provocan que el polímero se hinche. Las cadenas se vuelven más capaces de deslizarse después de la otra, y el polímero se vuelve más suave y más flexible. Los plastificadores deberían ser baratos, no tóxicos y no volátiles. Los asientos de vinilo y tapicería en los autos son de PVC con plastificador añadido. El plastificador en los primeros asientos de vinilo tendía a migrar hacia la superficie del polímero, entonces se volatilizaba hacia el aire. Las moléculas de plastificador que escapaban proporcionaban olor al nuevo auto, pero el olor también significaba que menos plastificador quedaba para mantener al PVC suave. Con el tiempo, el material se endurecía y rompía. Los plastificadores mejorados son menos volátiles y permanecen en el polímero por mucho más tiempo, pero las compañías de autos aun añaden componentes extras y más volátiles porque los consumidores esperan que los autos nuevos tengan ese olor característico a “nuevo”.




Los ***rellenos*** son cualquier material añadido a un polímero que no proporciona aumento a las propiedades mecánicas. Los rellenos se añaden para reducir los costos del producto. El material de relleno cuesta menos que el polímero, así es que cualquier mezcla de relleno y polímero que no afecte las propiedades sustancialmente será una opción más económica. El carbono negro, por ejemplo, se añade a los elastómeros en las llantas de un automóvil para reducir los costos y como un agente colorante.



Los ***agentes colorantes*** cambian la manera en que la luz es absorbida o reflejada por el polímero. Los ***colorantes*** se disuelven directamente en el polímero y frecuentemente son moléculas orgánicas. Los polímeros con color pueden ser claros o traslúcidos. Al contrario, los ***pigmentos*** no se disuelven en el polímero y hacen al producto opaco. El carbono negro es el pigmento más común utilizado en la industria.

Los ***estabilizadores*** son materiales añadidos a los polímeros para mejorar su resistencia al calor y la luz. El calor o la luz ultravioleta provocan que algunos enlaces se rompan. Como resultado, el polímero pierde fuerza, se vuelve más frágil y con frecuencia se decolora. La susceptibilidad a la degradación

varía según el polímero. El polietileno se deteriora más rápido, pero el PMMA permanece sin modificación a la luz ultravioleta durante años. Los estabilizadores hacen más lenta la degradación al fungir como aceptadores de radicales libres que protegen la integridad de la cadena de polímeros. Sin la adición de estabilizadores, las moléculas de PVC perderían átomos de cloro para formar ácido clorhídrico (HCI) y dejar una radical libre detrás. En presencia del oxígeno, la cadena inestable forma acetonas, y las propiedades mecánicas del polímero cambian sustancialmente. Las sales metálicas son utilizadas por lo común como estabilizadores.

¿Cómo se procesan los polímeros en productos comerciales?

5.10 PROCESAMIENTO DE POLÍMEROS

Los polímeros termoplásticos se producen en enormes cantidades como pequeñas pellets. Los compradores derriten las pellets y las convierten en fibras, películas o partes con forma. El principio para todas estas operaciones se enfoca alrededor de un ***extrusor*** para derretir las pellets y forzarlas a un dispositivo para darles forma. La mayoría de la gente está familiarizada con los extrusores aun si no reconocen el nombre. Máquinas para elaborar pasta, pistolas de pegamento, molinillos de carne y la mayoría de los accesorios de Play-Doh® son extrusores sencillos. Los componentes de los aparatos de extrusión utilizados en polímeros incluyen una ***tolva*** que almacena una cantidad de pellets y las alimenta directamente hacia una cámara (***barril***) con un tornillo calentado que da vueltas. El tornillo calentado derrite las pellets a polímero líquido, luego empuja lo derretido. Los volátiles no deseados incluyendo agua y solventes se envían hacia afuera mediante ventilación. Un esquema del extrusor se muestra en la figura 5-34.

| ***Extrusor*** |
Dispositivo utilizado en el procesamiento de polímeros que derrite pellets de polímero y los alimenta continuamente a través de un dispositivo para darles forma.

| ***Tolva*** |
Parte del aparato de extrusión que sostiene una gran cantidad de pellets de polímero mientras son alimentados hacia el barril.

| ***Barril*** |
Pieza del aparato de extrusión que contiene un tornillo calentado utilizado para derretir el polímero y forzarlo hacia la siguiente cámara.

La extrusión es un proceso continuo. Mientras la tolva tenga pellets y el motor continúe girando el tornillo, el proceso puede continuar. La extrusión produce grandes volúmenes de materiales poliméricos. El motor controla la velocidad, la cual puede cambiarse según el procesamiento se necesite cambiar. Las bandas térmicas que rodean al barril proporcionan el calor.

El propósito del extrusor es proporcionar un polímero fundido que es bombeado a su forma deseada y se deja enfriar. En las aplicaciones más sencillas, el polímero fundido es empujado a través de una serie de pantallas de malla que filtran cualquier partícula no derretida, polvo u otros contaminantes sólidos. Los filtros, llamados ***filtro de pantalla***, finalmente se obstruyen y se deben reemplazar. El polímero fundido entra a una herramienta de formación llamada ***troquel*** que se monta en el extremo del extrusor. El troquel generalmente se hace de acero inoxidable y coinciden hacia adentro para dar una forma simple al polímero, como vara, tubería o tubo. Una vez que emerge del troquel, el polímero formado se enfría con agua para ayudarle a solidificarse hacia su forma final. Frecuentemente, el polímero se pasa a través de una serie de placas para darle tamaño durante el proceso de enfriamiento y asegurar que la parte tome la forma apropiada.

| ***Filtro de pantalla*** |
Pieza del aparato de extrusión que se utiliza como filtro para separar partículas no derretidas, polvo y otro s sólidos contaminantes del polímero fundido.

| ***Troquel*** |
Parte del aparato de procesamiento del polímero a través del cual el polímero es empujado, provocando que el polímero forme una forma simple como una vara o un tubo.

Los cables cubiertos se hacen de la misma manera, excepto que el troquel se desalínea para que el cable pelado pueda alimentarse también a través de éste. El polímero fundido cubre el cable en el troquel. El agujero de salida hacia el troquel tiene un diámetro ligeramente más grande que el cable que controla el grosor del recubrimiento como se muestra en la figura 5-35.

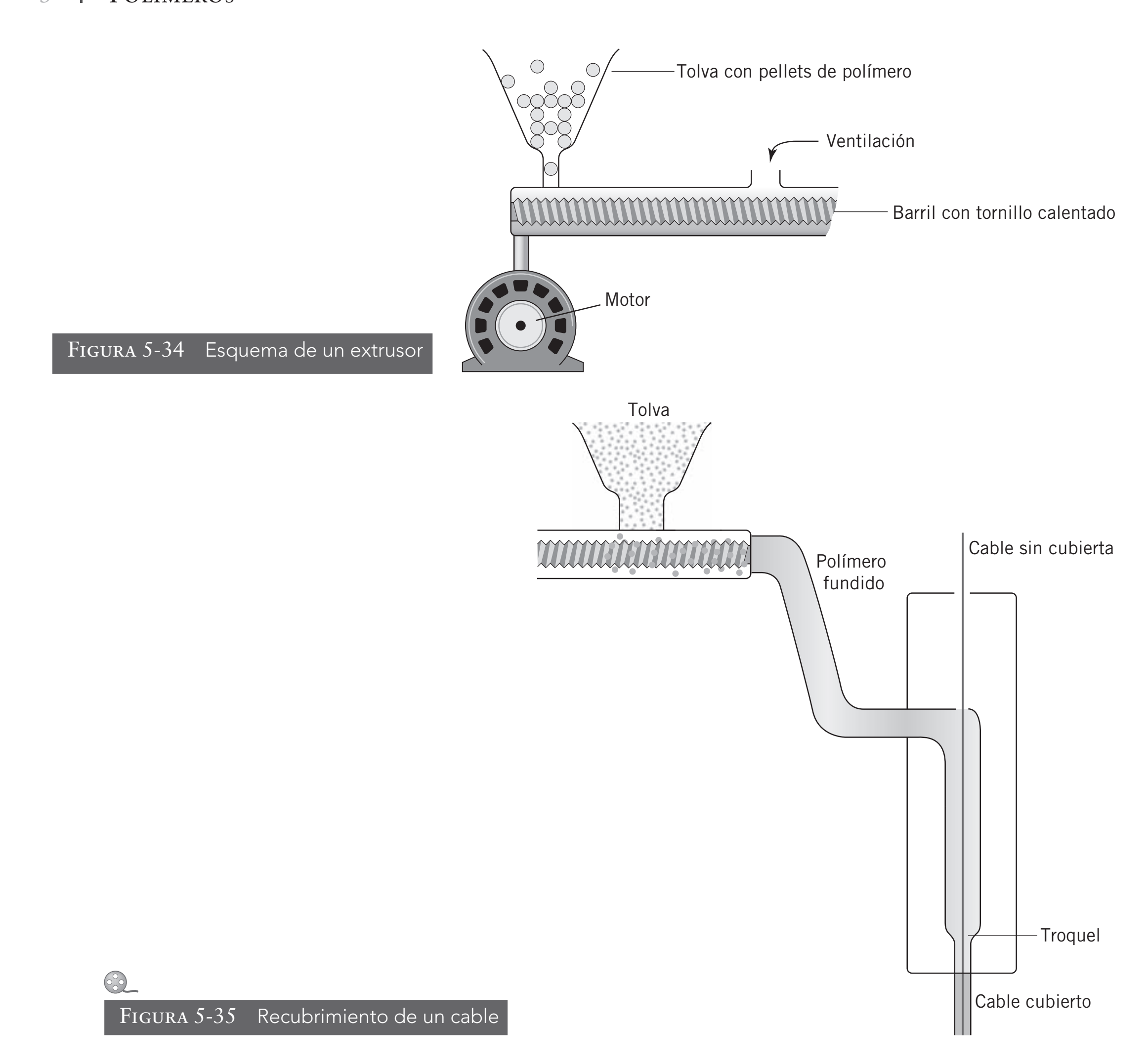


Figura 5-34 Esquema de un extrusor

Figura 5-35 Recubrimiento de un cable

| *Dispositivo hilador* | Bloque circular y fijo con pequeños orificios a través de los cuales el polímero fundido puede fluir para tomar la forma de una fibra.

| *Remolque* | Carrete grande que se utiliza para ventilar fibras de polímero solidificado después de que se han empujado a través del dispositivo hilador.

Hay muchas variaciones en el diseño de extrusores, incluyendo algunos que utilizan un par de tornillos que operan juntos para derretir y bombear el polímero. Sin embargo, todos los procesos de extrusión polimérica operan bajo el principio general descrito.

Cuando la meta de la extrusión es producir fibras delgadas, el troquel se reemplaza con un ***dispositivo hilador***. Las palabras *dispositivo hilador* verdaderamente son un mal nombre porque el aparato permanece fijo mientras dura el proceso de hilado de fibras. Un dispositivo hilador es una placa perforada con una serie de pequeños orificios (generalmente de 0.0005 pulgadas o menos de diámetro) como se muestra en la figura 5-36.

Cuando el polímero fundido extruido se empuja hacia la cima del dispositivo hilador, la gravedad estira el material a través de los orificios en forma de pequeñas cuerdas. Mientras el polímero pasa a través del aire por debajo del dispositivo hilador, se enfría y solidifica. Una bobina de aire rotatoria envía mediante ventilación a las fibras solidificadas hacia un carrete removible grande llamado ***remolque***, como se muestra en la figura 5-37. La bobina de aire también impone una tensión cortante sobre las fibras solidificantes corriente arriba mientras emergen del dispositivo hilador. Esta tensión cortante ayuda a

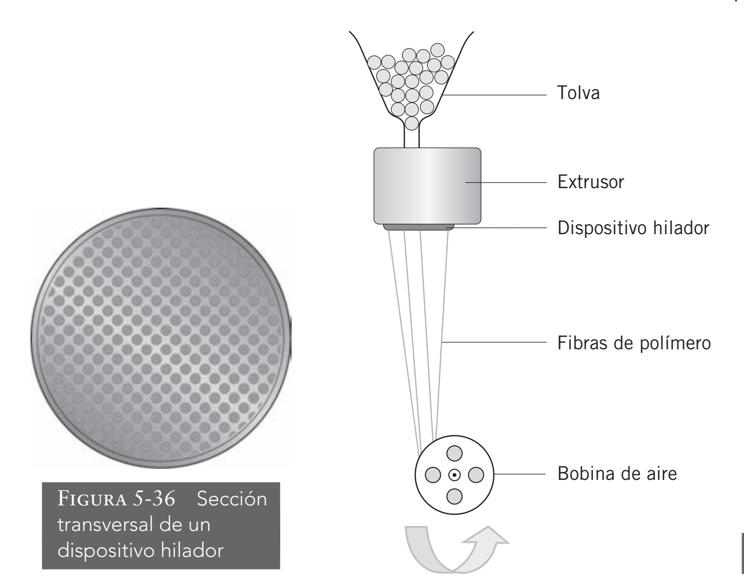


Figura 5-36 Sección transversal de un dispositivo hilador

Figura 5-37 Proceso de hilado por fundición

reducir el diámetro de la fibra y mejora la fuerza de la fibra. Todo el proceso completo se llama ***hilado por fundición.*** Aunque los orificios en la mayoría de los dispositivos hiladores son redondos, muchas otras formas se pueden hacer incluyendo los orificios en forma de y para formar las fibras trilobulares utilizadas en las alfombras.

| *Hilado por fundición* | Proceso de empujar polímeros a través de un dispositivo hilador y ventilar las fibras solidificadas hacia un remolque, el cual impone una tensión cortante sobre las fibras corriente arriba mientras emergen del dispositivo hilador.

Las películas delgadas utilizadas en recubrimientos, bolsas para basura y envolturas de alimentos también comienzan con un proceso de extrusión. Cuando el polímero fundido emerge del extrusor, pasa a un troquel tubular. El aire es forzado hacia adentro desde el troquel y fluye hacia arriba a través del polímero, formando una burbuja. La burbuja se expande y se enfría, abarcando un área más grande con una capa progresivamente más delgada de polímero rodeando el aire. El estiramiento también provoca que las moléculas se muevan más cerca y desarrollen una orientación más cristalina. El punto en el que la burbuja desarrolla esta formación más orientada se llama ***línea de congelamiento*** y puede identificarse por una pérdida de claridad. Cuando la burbuja alcanza el marco plegable, el material es apretado para mantener la burbuja, después enviado a una bobina muy similar a la del hilador de fibra, como se muestra en la figura 5-38.

| *Línea de congelamiento* | Término asociado con los aparatos de soplado de película, que indica el punto en el que las moléculas desarrollan una orientación más cristalina alrededor de la burbuja de aire.

El proceso final de procesamiento de polímero que se examina aquí es el ***moldeo por inyección.*** A diferencia de los sistemas de extrusión que se han comentado, el moldeo por inyección puede hacer partes con formas complejas. El proceso de moldeo por inyección comienza de la misma forma que los procesos de extrusión, con pellets en una tolva alimentadas hacia un barril que contiene un tornillo calentado. Sin embargo, el tornillo en una máquina de inyección tiene un movimiento recíproco que derrite el polímero a través de una mezcla de calor y acción mecánica. El polímero fundido se junta en un pequeño colector al final del barril. Cuando el peso apropiado del polímero fundido (llamado ***medida de la toma***) se ha acumulado en el colector, el final del barril se abre y el tornillo empuja todo el líquido hacia un molde. El tornillo entonces se retracta y el polímero se deja enfriar en el molde. Una vez enfriado, el molde se abre y la parte se remueve. El diseño del molde controla la forma del producto.

| *Moldeo por inyección* | Clase de procesamiento de polímero similar a la extrusión pero puede utilizarse para desarrollar rápidamente partes con formas complicadas.

| *Medida de la toma* | Peso especificado de un polímero inyectado hacia el molde al final del barril durante el proceso de moldeo por inyección.

La medida de la toma varía de unas cuantas onzas hasta unas 40 libras. Los primeros sistemas de moldeo por inyección tenían problemas con el endurecimiento prematuro del polímero y flujos incompletos, pero las técnicas

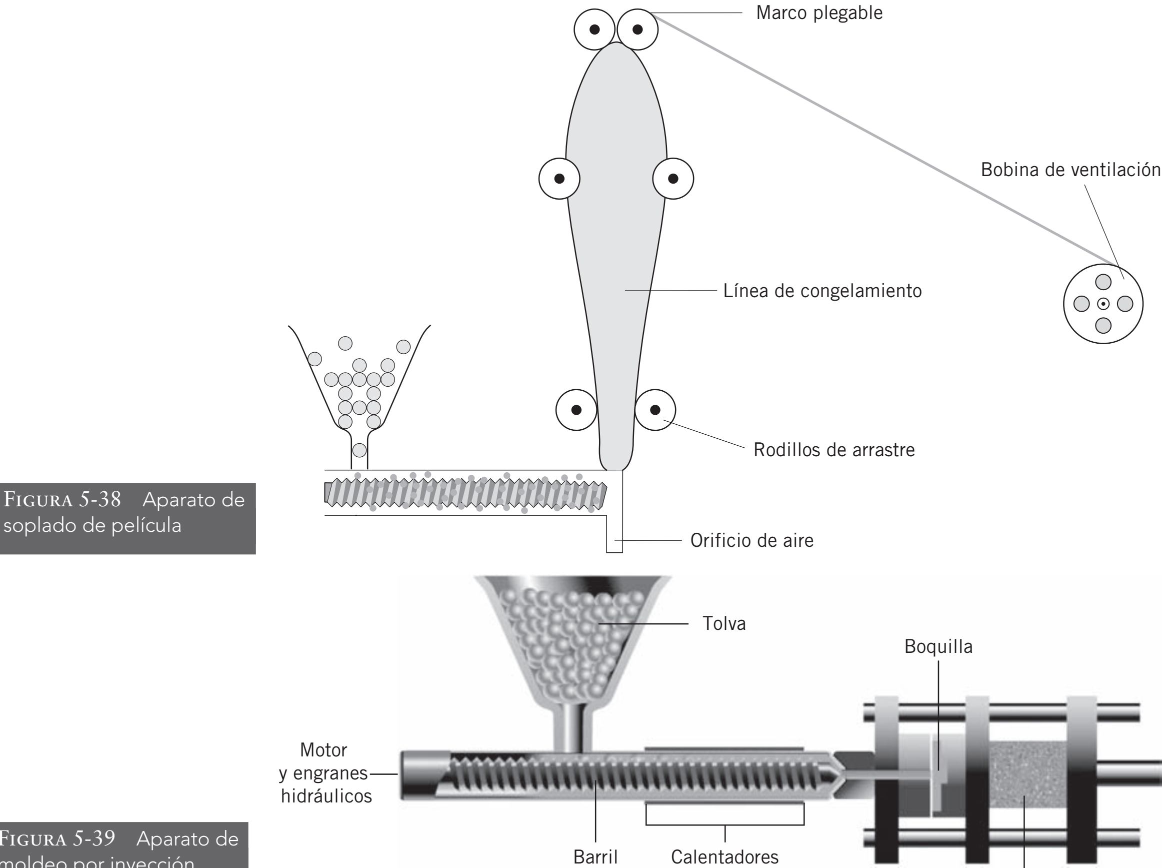


Figura 5-38 Aparato de soplado de película

Figura 5-39 Aparato de moldeo por inyección

modernas han controlado estos problemas. La figura 5-39 muestra un esquema del moldeo por inyección.

Todas las técnicas comentadas hasta ahora han involucrado la fundición de pellets termoplásticas. Los polímeros termoestables no se pueden formar a partir de ninguna de estas técnicas debido a que el entrecruzamiento entre las cadenas impide que se fundan. En su lugar, la polimerización de termoestables debe suceder en su forma final. Con frecuencia, las reacciones de polimerización se llevan a cabo en moldes. Los super comerciales estuches para niños de bichos mutantes involucran la mezcla de reactivos en moldes con forma de araña que se calientan en un horno incluido para formar una criatura polimérica termoestable. Algunos termoestables se entrecruzarán a temperatura ambiente y requerirán solo tiempo; otros necesitan calentarse.

| *Hilado por solución* | Proceso de empujar polímeros a través de un dispositivo hilador y ventilar las fibras solidificadas hacia un remolque, el cual impone una tensión cortante sobre las fibras corriente arriba mientras emergen del dispositivo hilador.

Las fibras termoestables se producen a través de una técnica llamada ***hilado por solución*** ilustrada en la figura 5-40. Los reactivos para la polimerización se mezclan en un solvente (con frecuencia una solución ácida concentrada) y se pasan a través de un dispositivo hilador. La reacción de polimerización sucede durante el proceso de hilado. Las nuevas fibras formadas emergen del dispositivo hilador, pasan a través de un entrehierro que ayuda a realinear las moléculas, después entran a un baño de templado y son sopladas hacia un remolque, muy similar a un material termoplástico. Muchos polímeros de alto desempeño, incluyendo el PPTA y el PBO, se hacen mediante el proceso de hilado de solución.

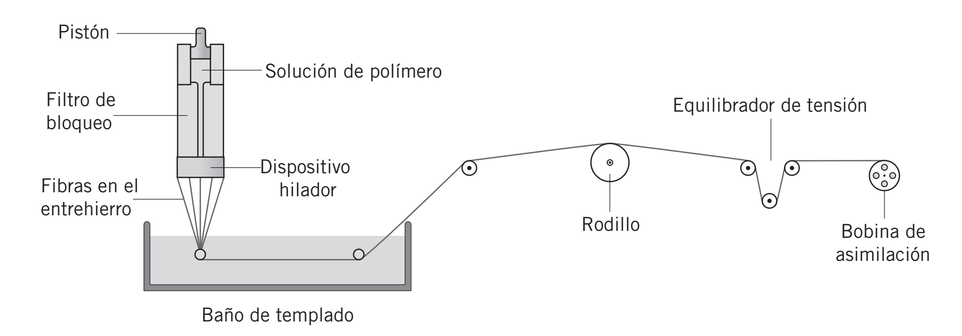


Figura 5-40 Hilado por solución de termoestables

¿Qué les sucede a los polímeros cuando se desechan?

Después de que los polímeros se convierten en productos comerciales y se venden al consumidor, se utilizan durante algún tiempo y luego se desechan. Hasta los años noventa, casi 90% de los materiales poliméricos en uso comercial se enterraban en basureros, y alrededor de 10% se incineraban. En 1991, 74 mil millones de toneladas de materiales plásticos fueron desechadas en Estados Unidos con menos de 2% reciclado.

Las leyes europeas obligan al reciclaje de la mayoría de los materiales, incluyendo los polímeros termoplásticos, y se propusieron el reciclaje total para el 2010. Estados Unidos está detrás de estos esfuerzos, debido a los costos de reciclaje que pasarían hacia el consumidor y las dificultades para recabar, transportar y clasificar el desperdicio de un país tan vasto. La figura 5-41 muestra el ciclo de vida de los materiales utilizados en la manufactura de muchos polímeros.

5.11 RECICLAJE DE POLÍMEROS

Técnicamente, el reciclaje de polímeros incluye plantas de reciclaje y desperdicio post-consumidor. La planta de reciclaje involucra el remolido y refundido del polímero chatarra que nunca dejó la planta en un producto terminado. El desperdicio post-consumidor incluye todos los materiales poliméricos que se desecharon después de dejar la planta.

La principal dificultad surge de la diversidad de materiales poliméricos en uso. Cuando el vidrio y las latas de aluminio se reciclan, se pueden convertir a esencialmente los mismos productos repetidamente, pero rara vez sucede con los polímeros. La mayoría de los polímeros comerciales incluyen agentes colorantes, plastificadores y otros aditivos que deben removerse para cualquier actividad práctica de reciclaje. Una segunda dificultad surge con la clasificación. Una botella hecha de PVC se parece mucho a una botella hecha de PET, pero químicamente son muy diferentes. No se pueden mezclar sin alterar significativamente las propiedades del nuevo material.

Para facilitar el proceso de clasificación, la Society of the Plastics Industry desarrolló un código de identificación que se coloca en la mayoría de los productos de polímero. La tabla 5-4 resume estos códigos.

El sistema de numeración no implica que todos estos polímeros sean reciclados. En la mayoría de las comunidades, el PET y el HDPE se aceptan para el reciclaje. En algunos casos, el LDPE se recicla, pero pocas compañías comerciales

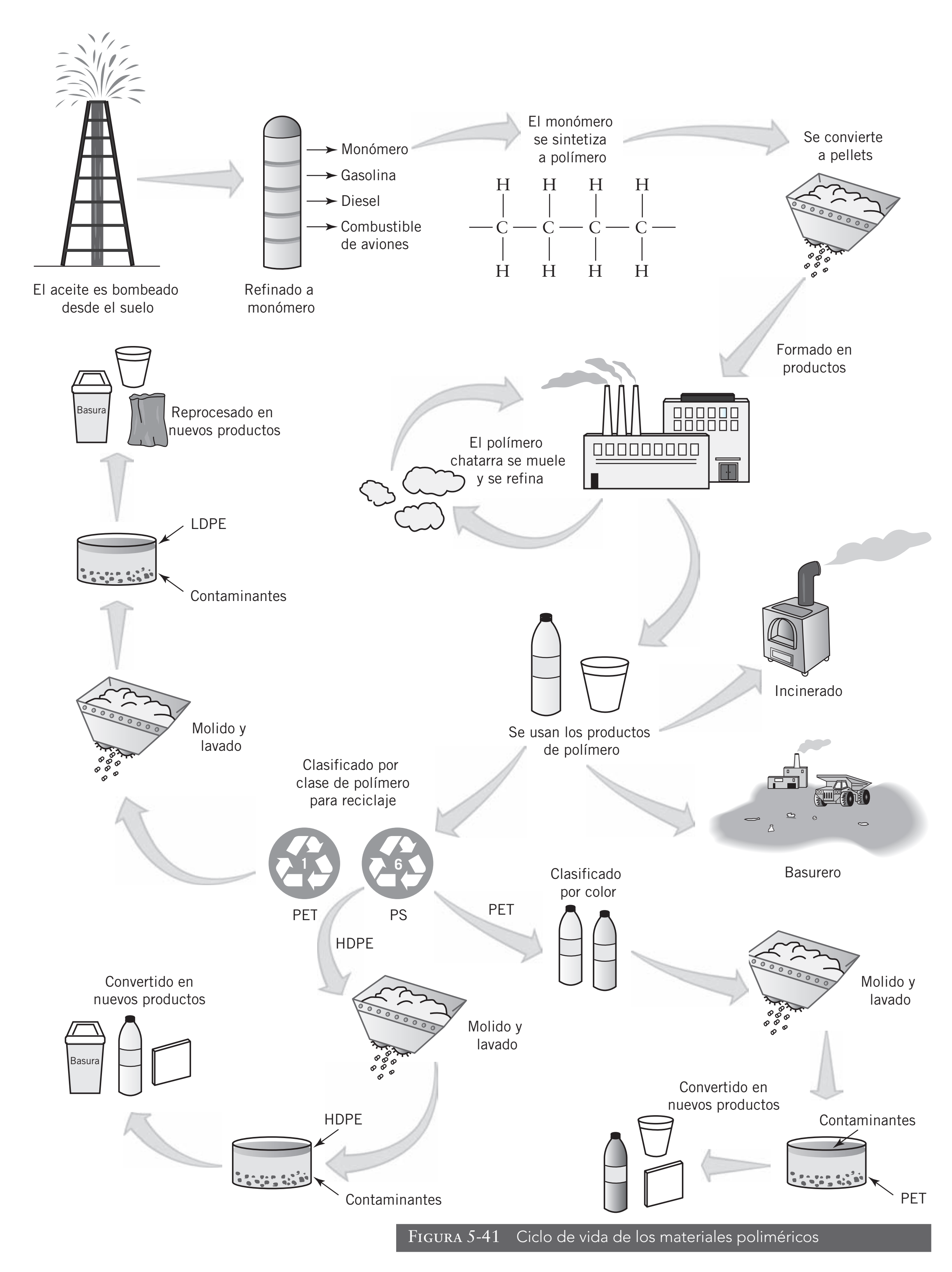


Figura 5-41 Ciclo de vida de los materiales poliméricos

Tabla 5-4 Símbolos de reciclaje para plásticos comunes

Símbolo	*Material*	*Usos comunes*
1 PET	Tereftalato de polietileno (PET)	Botellas de refresco Fibras de tapetes
2 HDPE	Polietileno de alta densidad (HDPE)	Botellas de leche Botellas de shampoo Bolsas de plástico Vasos de plástico duro Botellas deportivas
3 PVC	Cloruro de polivinilo (PVD)	Botellas de aceite Tuberías Moldes
4 LDPE	Polietileno de baja densidad (LDPE)	Bolsas para abarrotes de plástico Papel envolvente Maderas plásticas
5 PP	Polipropileno (PP)	Popotes para beber Tapas de botellas Muebles de plástico
6 PS	Poliestireno (PS)	Empaques Vasos para bebidas Empaques para carnes

encuentran económico el reciclaje de otros polímeros. La mayoría de los polímeros y mezclas de polímeros se continúan enterrando en basureros.

El PET es uno de los polímeros más fáciles de reciclar. Las botellas de bebidas se clasifican por color, luego se muelen como pellets y se lavan. El PET es más denso que el agua, así es que se hunde hasta el fondo durante el lavado mientras que el HDPE y cualquier residuo de etiquetas flotan hacia la superficie. Las pellets limpias se recolectan y tienen muchos usos, incluyendo las fibras de tapetes, botellas nuevas y relleno para almohadas. Los factores limitantes para el reciclaje del PET suelen ser la necesidad de clasificar a mano y el costo del embarque de las voluminosas pacas de botellas de refresco vacías al reciclador.

El HDPE también debe clasificarse a mano. Los productos de HDPE transparentes se muelen en pequeñas hojuelas y se lavan. El polietileno flota mientras

que muchos contaminantes se hunden. El HDPE reciclado ya sea que se tiña o no y se reprocesa en una variedad de productos. Las botellas que contienen materiales para consumo humano no utilizan materiales reciclados. Los productos de HDPE de color se mezclan, se hacen hojuelas y se pintan de negro.

Muchos centros de reciclaje no aceptan el LDPE, a excepción de aquellos que sí operan con recicladores similares a los del HDPE. Las bolsas para basura, tuberías y maderas plásticas con frecuencia tienen algo de LDPE reciclado.

El PVC es difícil de reciclar, en parte porque rara vez se utiliza solo. Generalmente, el PVC comercial es tratado con antioxidantes, agentes colorantes, plastificadores y aditivos para hacerlo más resistente a la luz ultravioleta. El PVC también requiere más energía de proceso para fabricarse que cualquiera de los termoplásticos principales.

Los plásticos que no se reciclan se vuelven al ecosistema. Muchos de los polímeros generalmente son benignos, pero los colorantes y los plastificadores en los mismos pueden contener toxinas, incluyendo plomo y cadmio. Algunos estudios atribuyen a los plásticos desechados tanto como 28% de toda la contaminación de cadmio tóxico en el desperdicio municipal estadounidense. Para algunos polímeros, la incineración proporciona una alternativa consciente de energía debido a que el calor generado durante la incineración se puede utilizar para generar vapor. Los hidrocarbonos se queman bien y (con control y depuración apropiadas) generan sólo dióxido de carbono y agua como productos intermedios. Sin embargo, los inorgánicos y otros contaminantes se acumulan en las cenizas del incinerador. Las pruebas han revelado niveles de furano, dioxina, cadmio y plomo en las cenizas del incinerador que superan los reglamentos federales.

La investigación significativa está enfocada en hacer el reciclaje de los polímeros más viable comercialmente. Diversos sistemas de polímeros reciclados clasificados de forma automática se están desarrollando y probando. También existe un empuje significativo para el ***diseño para el reciclaje (DFR)***, el cual en esencia pretende considerar el ciclo de vida en el diseño del producto. Los diseñadores de productos son animados para utilizar polímeros reciclados en donde sea práctico, y para utilizar un solo polímero en vez de una mezcla, en donde sea práctico.

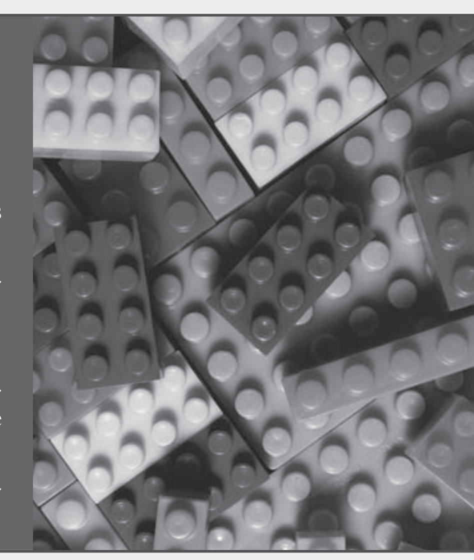
| ***Diseño para el reciclaje (DFR)*** | Esfuerzo para considerar las consecuencias del ciclo de vida al diseñar un material o producto.

En adición a las dificultades de clasificación y remoción de aditivos, los polímeros usados invariablemente experimentan alguna degradación de la exposición al medio ambiente. El calor y la luz ultravioleta dañan el polímero, y mientras los estabilizadores hacen más lenta la progresión, no se puede frenar totalmente. La oxidación también da como resultado en uniones rotas y propiedades mecánicas reducidas. Consideraciones de entropía también resultan en cadenas más enredadas y menos flexibles a través del tiempo. No hay manera alguna de recuperar las propiedades originales del polímero en su totalidad. Como resultado, los polímeros reciclados proporcionan sólo una fracción de las cadenas totales en las nuevas aplicaciones.

Resumen del capítulo 5

En este capítulo se examinaron:

- La terminología básica y la nomenclatura de los polímeros.
- Las características y aplicaciones de las clases de polímeros comerciales.
- Los mecanismos de adición y polimerización por condensación.
- Los tipos de enlaces encontrados en los polímeros y su impacto en las propiedades.
- Cómo determinar la tacticidad en los polímeros y su impacto en la cristalinidad.
- Las barreras de energía que regulan la conformación.
- Cómo se procesan los polímeros en materiales útiles a través de la extrusión, soplado de películas, hilado por fundición, moldeo por inyección e hilado por solución.
- Cuestiones que impactan el reciclaje y/o la eliminación de materiales poliméricos.



Términos clave

aditivos *p. 176*
acrílico *p. 153*
agentes colorantes *p. 176*
agrietamiento *p. 161*
aramida *p. 154*
atáctico *p. 170*
barril *p. 177*
colorantes *p. 176*
configuración *p. 169*
conformación *p. 173*
conformación alternada *p. 175*
conformación eclipsada *p. 175*
conformación sesgada *p. 176*
conformación trans *p. 176*
constitución *p. 167*
copolímero *p. 151*
copolímeros aleatorios *p. 152*
copolímeros alternantes *p. 152*
copolímeros de injerto *p. 153*
copolímeros en bloque *p. 152*
diada isotáctica *p. 170*
diada sindiotáctica *p. 170*
diseño para el reciclaje (DFR) *p. 184*
dispositivo hilador *p. 178*
elastómeros *p. 158*
enlace primario *p. 167*
enlace secundario *p. 167*
esqueleto del polímero *p. 151*
estabilizadores *p. 176*
extrusor *p. 177*
filtro de pantalla *p. 177*
funcionalidad *p. 167*
grado de polimerización *p. 151*
grupos funcionales *p. 164*
grupos laterales *p. 151*
grupos terminales *p. 163*
hilado por fundición *p. 178*
hilado por solución *p. 180*
homopolímero *p. 164*
iniciación *p. 162*
línea de congelamiento *p. 179*
masa molecular relativa (RMM) *p. 165*
medida de la toma *p. 179*
mezclas *p.153*
moldeo por inyección *p. 179*
monómero de vinilo *p. 162*
monómeros *p. 150*
nylon *p. 154*
oligómeros *p. 150*
peso molecular promedio en número *p. 166*
peso molecular promedio en peso *p. 166*
pigmentos *p. 176*
plastificadores *p. 176*
poliamidas *p. 154*
poliésteres *p. 155*
polímeros *p. 150*
polimerización por adición *p. 161*
polimerización por condensación *p. 161*
polimerización por crecimiento en etapas *p. 163*
poliolefinas *p. 155*
poliuretanos *p. 158*
proceso viscoso *p. 157*
propagación *p. 163*
radical libre *p. 163*
ramificaciones p. 156
rayón *p. 157*
rellenos *p. 176*
remolque *p. 178*
tacticidad *p. 170*
terminación *p. 163*
terminación mutua *p. 163*
terminación primaria *p. 163*
termoestables *p. 151*
termoplásticos *p. 151*
termoplásticos de alto volumen (HVTP) *p. 157*
temperatura de transición vítrea *p. 160*
templado *p. 164*
tolva *p. 177*
troquel *p. 177*
unidad estructural *p. 151*
vulcanización *p. 159*

Problemas de tarea

1. Muestre dos diferentes vías para formar cloruro sindiotáctico de polivinilo con un grado de polimerización de 4.
2. Una mezcla contiene 45 wt% de poliestireno y 55 wt% de polipropileno. ¿Cuál es la fracción molar de poliestireno en la mezcla?
3. Muestre las reacciones necesarias para formar Nylon 6,6, con un grado de polimerización de 3.
4. Determine el grado promedio de polimerización para un PMMA con una masa molecular relativa de 120 000.
5. Calcule el peso molecular promedio en número y el peso molecular promedio en peso para un polímero con las fracciones de masa enlistadas:

Rango RMM	Fracción de masa
0-2 500	0.03
2 500-5 000	0.12
5 000-7 500	0.08
7 500-10 000	0.24
10 000-12 500	0.22
12 500-15 000	0.15
15 000-17 500	0.11
17 500-20 000	0.05

6. Calcule el peso molecular promedio en número y el peso molecular promedio en peso para un polímero con las fracciones de masa enlistadas:

Rango RMM	Fracción de masa
0-2 500	0.01
5 000-10 000	0.10
10 000-15 000	0.12
15 000-20 000	0.14
20 000-25 000	0.18
25 000-30 000	0.25
30 000-35 000	0.13
35 000-40 000	0.07

7. ¿Cómo podría la curva de esfuerzo-deformación cambiar para un polímero si fuera probada la tracción por arriba y por debajo de su temperatura de transición vítrea?
8. ¿Cuáles de los polímeros en la tabla 5-1 son capaces de formar diadas isotácticas y sindiotácticas?
9. Muestre las reacciones necesarias para generar un polímero con grado de polimerización de 4 desde este monómero:

$$H_2C{=}CH(C_3H_3O_2)$$

10. Marque el rango de estos polímeros en orden de su capacidad para cristalizarse. Explique las bases de su orden: PE, PP, PVC, PVDC.
11. Para un polímero dado consistente de 1 000 cadenas, el peso molecular promedio en número es de 4 000 y la cantidad es $\Sigma n_i M_i^2 = 1.96 \times 10^{11}$. Determine el peso molecular promedio en peso para la muestra.
12. Explique la diferencia entre un copolímero y una mezcla de polímero.
13. Para el polimetilmetacrilato,
    a) Describa la influencia de los enlaces primarios y secundarios, incluyendo las interacciones entre las moléculas en una cadena y entre cadenas adyacentes.
    b) ¿Existen elementos de tacticidad? Si es así, dibuje y marque los isómeros estructurales relevantes.
    c) Muestre las series de reacciones que llevaron a la formación de PMMA.
14. Muestre cuáles combinaciones de grupos funcionales en la figura 5-27 son capaces de someterse a reacciones de condensación uno con el otro y cuáles serían los productos de la reacción.
15. Explique la diferencia entre la temperatura de derretimiento y la temperatura de transición vítrea de un polímero.
16. Un estudiante dice que puede probar que la cristalinidad de una muestra de polímero específica es de 27%. ¿Qué está mal en esta declaración?
17. Encuentre 10 artículos alrededor de su residencia que estén hechos de polímeros. Identifique el polímero principal utilizado en cada artículo y dibuje su unidad estructural.
18. Explique por qué las aramidas son más fuertes que otras poliamidas.

19. Comente las barreras primarias para establecer el reciclaje comercial de otros polímeros termoplásticos.

20. Explique por qué es más difícil para la cadena de carbono rotar en una molécula de poliestireno que en una molécula de polietileno.

21. ¿Por qué es más difícil hacer cadenas grandes de polimerización por condensación que de polimerización por adición?

22. ¿Por qué es importante formar una distribución de peso molecular estrecha?

23. ¿Cómo afectaría la copolimerización a la cristalinidad?

24. Para las siguientes aplicaciones, sugiera un material polimérico posible. Describa su idoneidad basado en las propiedades mecánicas, costos y reciclabilidad:

a) Matamoscas

b) Mesa de picnic para niños

c) Rellenos

25. Proporcione un análisis de ciclo de vida cualitativo para las bolsas para abarrotes plásticas.

26. ¿Por qué los polímeros termoestables no se pueden moldear por inyección?

27. Explique la diferencia entre el moldeo por inyección y la extrusión a través de un troquel.

28. ¿Por qué es tan importante controlar la temperatura en la extrusión y el moldeo por inyección?

29. ¿Cuál es el número más grande de entrecruzamientos teoréticos posibles al vulcanizar 100 g de cadenas de poliisopropeno?

30. Explique por qué el ácido tereftálico utilizado en la formación del PET siempre reacciona con el extremo del etilén glicol de la cadena creciente y nunca con el extremo del ácido tereftálico?

31. ¿Qué influencia deberían tener las ramificaciones en los polímeros reciclables?

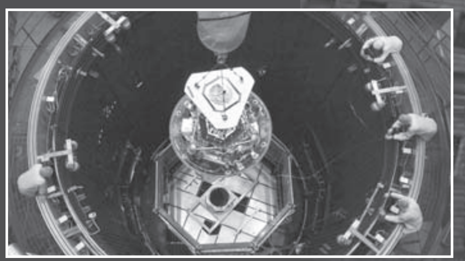
32. Explique los elementos constitucionales, configuracionales y conformacionales presentes en el poliestireno. (Comience por definir los términos y después explique cómo se aplican al poliestireno, por ejemplo, ¿qué configuraciones posibles podría tomar la molécula?, etc.)



Materiales cerámicos y de carbono

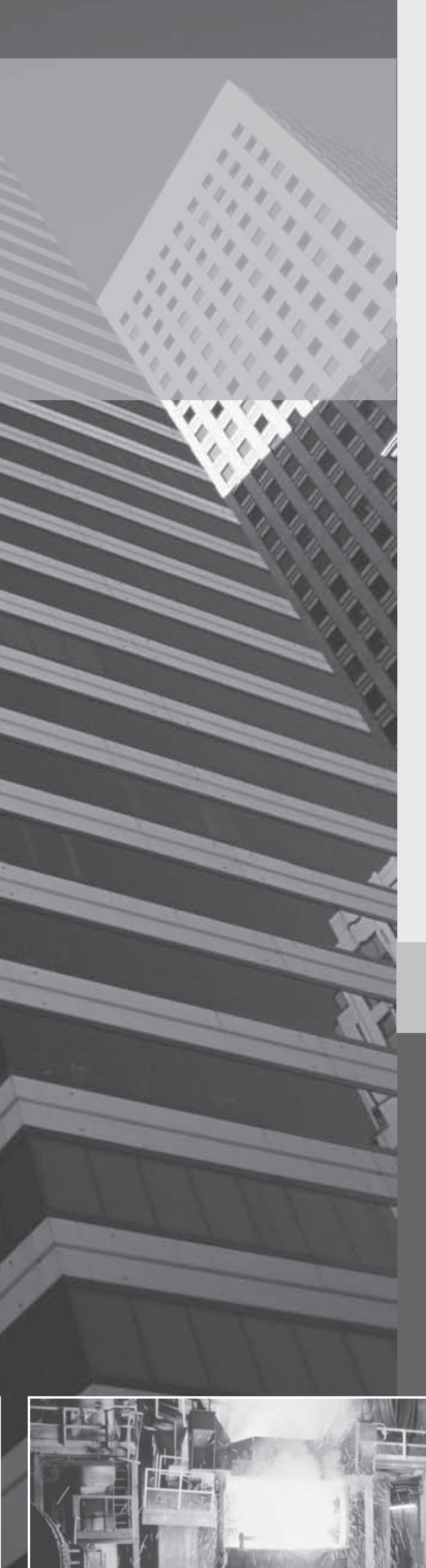
PhotoAlto/ SUPERSTOCK











CONTENIDO

Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el alumno debe ser capaz de:

- Definir un material cerámico e identificar las características físicas y mecánicas comunes de los cerámicos.
- Calcular el número de coordinación para una red cristalina de cerámico.
- Identificar y describir los sistemas cristalinos primarios comunes en los cerámicos.
- Entender el rol de los sitios intersticiales octaédricos y tetraédricos en la estructura cristalina de los cerámicos.
- Describir las siete clases básicas de los materiales cerámicos.
- Explicar el rol de los abrasivos en la industria.

- Describir los principios operativos detrás de la lija y otros procesos de materiales abrasivos.
- Explicar la relevancia del diagrama de fase del silicio para hacer vidrio.
- Explicar el proceso del vidrio flotante.
- Identificar las microestructuras y propiedades asociadas con los vidrios.
- Describir el rol del tetraedro SiO_4^{4-} en los vidrios.
- Describir las diferencias entre sinterización y vitrificación.
- Explicar los fundamentos de la química del cemento.
- Enlistar los constituyentes primarios en el cemento Portland y definir su rol en el proceso de hidratación.
- Describir el rol del cemento en el diseño industrial.
- Distinguir entre las diferentes clases del cemento Portland.
- Definir los cerámicos blancos y explicar los procesos de cocción y vidriado.
- Comentar el rol de los refractarios en la industria.
- Distinguir entre las clases principales de ladrillos refractarios.
- Definir los productos estructurales de la arcilla y explicar sus usos en la industria.
- Describir los desarrollos constantes en los cerámicos avanzados.
- Explicar por qué el grafito parece un polímero pero se comporta como un cerámico.
- Explicar cómo es que los diamantes obtienen sus propiedades únicas mecánicas
- Describir cómo se hacen las fibras de carbono y su uso en la industria.
- Describir los nanotubos de carbono y sus usos potenciales en la industria.

¿Qué son los materiales cerámicos?

6.1 ESTRUCTURAS CRISTALINAS EN LOS CERÁMICOS

| ***Cerámicos*** |
Compuestos que contienen átomos metálicos enlazados a átomos no metálicos como el oxígeno, el carbono o el nitrógeno.

Cuando la mayoría de la gente escucha la palabra **cerámicos**, tienden apensar en estatuas de arcilla horneadas o vajillas. De hecho, la palabra cerámica se deriva de la palabra griega *keramos*, que significa alfarería. Sin embargo, los cerámicos conllevan un espectro mucho más grande de tipos de materiales y usos.

Como se comentó en el capítulo 1, los materiales cerámicos son compuestos que contienen átomos metálicos enlazados a elementos no metálicos, más comúnmente el oxígeno, el nitrógeno o el carbono. Esta amplia definición resulta en un amplio espectro de propiedades materiales. La mayoría de los cerámicos tienen enlaces iónicos, pero muchos contienen una mezcla de enlaces iónicos y covalentes. Estos enlaces proporcionan a la mayoría de los materiales cerámicos dureza, resistencia al desgaste y estabilidad química; son inmunes a la corrosión, porque de hecho, ya están corroídos.

Cuando el enlace es principalmente iónico, la red cristalina resultante consiste de cationes metálicos y aniones no metálicos. La presencia de estos iones hace que la red cristalina de los cerámicos sea más complicada que la de un metal puro. Primero, la carga neta del sistema debe estar en balance. Si los iones de titanio (Ti^{4+}) están en una red cristalina con iones de óxido (O^{2-}), entonces debe haber el doble de iones de óxido presentes para balancear la carga de los iones del titanio.

Los cationes son más pequeños que los aniones, así que la proporción del radio del catión (r_c) al radio del anión (r_a) es menor que 1. Los cationes más grandes, mostrados en la figura 6-1*b*), contactan más aniones que los cationes más pequeños, como se muestra en la figura 6-1*a*). Cada catión preferirá estar en contacto con muchos aniones como sea posible, mientras que cada anión preferirá contactar tantos cationes como sea posible. El ***número de coordinación*** de la red cristalina se define como el número de aniones que cada catión contacta, y está controlado por el radio atómico y la geometría. La tabla 6-1 resume el coeficiente mínimo del radio atómico necesario para lograr una red cristalina estable para cada número de coordinación. La tabla 6-2 resume el radio iónico para los cationes y los aniones.

| ***Número de coordinación*** |
Número de aniones en contacto con cada catión en una red cristalina de cerámico.

Estos números de coordinación impactan los tipos de estructuras cristalinas que forman los cerámicos. Estas estructuras se clasifican a groso modo por el número de diferentes cationes y aniones presentes en cada red cristalina. Las estructuras más sencillas, que contienen un catión para cada anión se clasifican como sistemas AX, donde A representa al catión y X al anión. Cuando las cargas del catión y el anión son diferentes, la red cristalina se clasifica como un sistema A_mX_p, donde m ≠ p. Finalmente, cuando un cerámico tiene dos

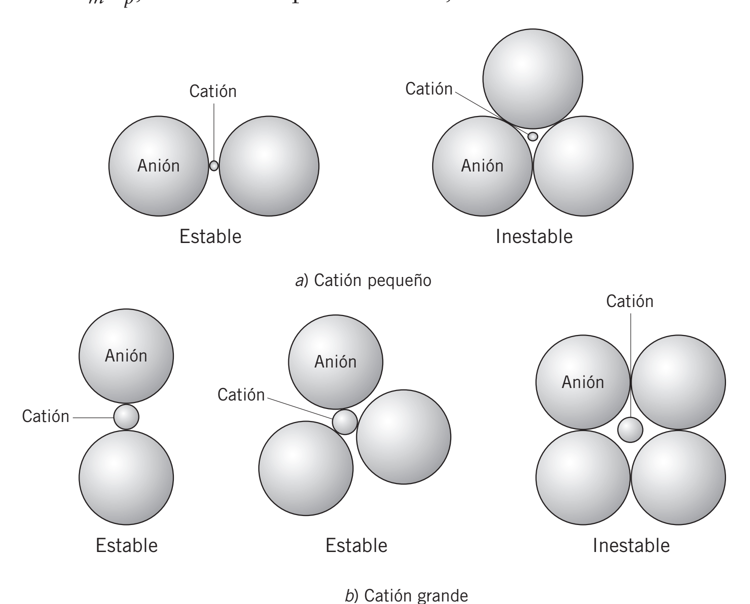


Figura 6-1 Ilustración de la influencia de los coeficientes del radio en los números de coordinación estables

Tabla 6-1 Resumen de coeficientes de radios iónicos para los números de coordinación estables

Número de coordinación	*Valor r_c/r_a*
2	<. 155
3	0.155−225
4	0.225−414
6	0.414−732
8	0.732−1.0

Tabla 6-2 Radios iónicos

Especies atómicas	*Ión*	*Radio iónico (nm)*	*Especies atómicas*	*Ión*	*Radio iónico (nm)*
Actinio	Ac^{3+}	0.118	Níquel	Ni^{2+}	0.078
Aluminio	Al^{3+}	0.057	Niobio	Nb^{4+}	0.074
Antimonio	Sb^{3+}	0.09		Nb^{5+}	0.69
Arsénico	As^{3+}	0.069	Nitrógeno	N^{5+}	0.01 - 0.02
	As^{5+}	~0.04	Osmio	Os^{4+}	0.067
Astato	At^{7+}	0.062	Oxígeno	O^{2-}	0.132
Bario	B^{2+}	0.143	Paladio	Pd^{2+}	0.05
Berilio	Be^{2+}	0.054	Fósforo	P^{5+}	0.03 - 0.04
Bismuto	Bi^{3+}	0.12	Platino	Pt^{2+}	0.052
Boro	B^{3+}	0.02		Pt^{4+}	0.055
Bromo	Br^{-}	0.196	Polonio	Po^{6+}	0.067
Cadmio	Cd^{2+}	0.103	Potasio	K^{+}	0.133
Calcio	Ca^{2+}	0.106	Praseodimio	Pr^{3+}	0.116
Carbono	C^{4+}	<0.02		Pr^{4+}	0.1
Cerio	Ce^{3+}	0.118	Prometio	Pm^{3+}	0.106
	Ce^{4+}	0.102	Radio	Ra^{+}	0.152
Cesio	Cs+	0.165	Renio	Re^{4+}	0.072
Cloro	Cl^{-}	0.181	Rodio	Rh^{3+}	0.068
Cromo	Cr^{3+}	0.064		Rh^{4+}	0.065
	Cr^{6+}	0.03 - 0.04	Rubidio	Rb^{+}	0.149
Cobalto	Co^{2+}	0.082	Rutenio	Ru^{4+}	0.065
	Co^{3+}	0.065	Samario	Sm^{3+}	0.113
Cobre	Cu^{+}	0.096	Escandio	Sc^{2+}	0.083
	Cu^{2+}	0.072	Selenio	Se^{2-}	0.191
Disprosio	Dy^{3+}	0.107		Se^{6+}	0.03 - 0.04
Erbio	Er^{3+}	0.104	Silicio	Si^{4-}	0.198
Europio	Eu^{3+}	0.113		Si^{4+}	0.039
Fluorina	F^{-}	0.133	Plata	Ag^{+}	0.113

Tabla 6-2 Radios iónicos

Especies atómicas	*Ión*	*Radio iónico (nm)*	*Especies atómicas*	*Ión*	*Radio iónico (nm)*
Francio	Fr^{+}	0.18	Sodio	Na^{+}	0.102
Gadolino	Gd^{3+}	0.111	Estroncio	Sr^{2+}	0.127
Galio	Ga^{3+}	0.062	Azufre	S^{2-}	0.174
Germanio	Ge^{4+}	0.044		S^{6+}	0.034
Oro	Au^{+}	0.137	Tantalio	Ta^{5+}	0.068
Hafnio	Hf^{4+}	0.084	Telurio	Te^{2}	0.211
Holmio	Ho^{3+}	0.105		Te^{4+}	0.089
Hidrógeno	H^{-}	0.154	Terbio	Tb^{3+}	0.109
Indio	In^{3+}	0.092		Tb^{4+}	0.089
Yodo	I^{-}	0.22	Talio	Tl^{+}	0.149
	I^{5+}	0.094		Tl^{3+}	0.106
Iridio	Ir^{4+}	0.066	Torio	Th^{4+}	0.11
Hierro	Fe^{2+}	0.087	Tulio	Tm^{3+}	0.104
	Fe^{3+}	0.067	Estaño	Sn^{4-}	0.215
Lantano	La^{3+}	0.122		Sn^{4+}	0.074
Plomo	Pb^{4-}	0.215	Titanio	Ti^{2+}	0.076
	Pb^{2+}	0.132		Ti^{3+}	0.069
	Pb^{4+}	0.084		Ti^{4+}	0.064
Litio	Li^{+}	0.078	Tungsteno	W^{4+}	0.068
Lutecio	Lu^{3+}	0.099		W^{6+}	0.065
Magnesio	Mg^{2+}	0.078	Uranio	U^{4+}	0.105
Manganeso	Mn^{2+}	0.091	Vanadio	V^{3+}	0.065
	Mn^{3+}	0.07		V^{4+}	0.061
	Mn^{4+}	0.052		V^{5+}	˜0.04
Mercurio	Hg^{2+}	0.112	Iterbio	Yb^{3+}	0.1
Molibdeno	Mo^{4+}	0.068	Itrio	Y^{3+}	0.106
	Mo^{5+}	0.065	Zinc	Zn^{2+}	0.083
Neodimio	Nd^{3+}	0.115	Zirconio	Zr^{4+}	0.087

especies de cationes con cargas diferentes, el sistema se clasifica como un sistema $A_mB_nX_p$.

Las cavidades intersticiales entre átomos en la red cristalina se vuelven muy importantes cuando se consideran las estructuras de cerámicos, ya que los átomos o iones pueden ocupar estas aperturas. Para muchos cerámicos existen dos tipos distintos de espacios intersticiales en las redes cristalinas FCC (cúbicas de cara centrada) comunes. Ocurren cuatro vacantes intersticiales en los puntos en los cuales tres átomos en un plano entran en contacto con un cuarto átomo en un plano adyacente, como se muestra en la figura 6-2. Éstas se conocen como ***posiciones tetraédricas*** por las líneas dibujadas desde el centro de los átomos que forman un tetraedro.

| ***Posiciones tetraédricas*** | Cuatro sitios intersticiales presentes en las redes cristalinas que forman un tetraedro cuando las líneas son dibujadas desde el centro de los sitios.

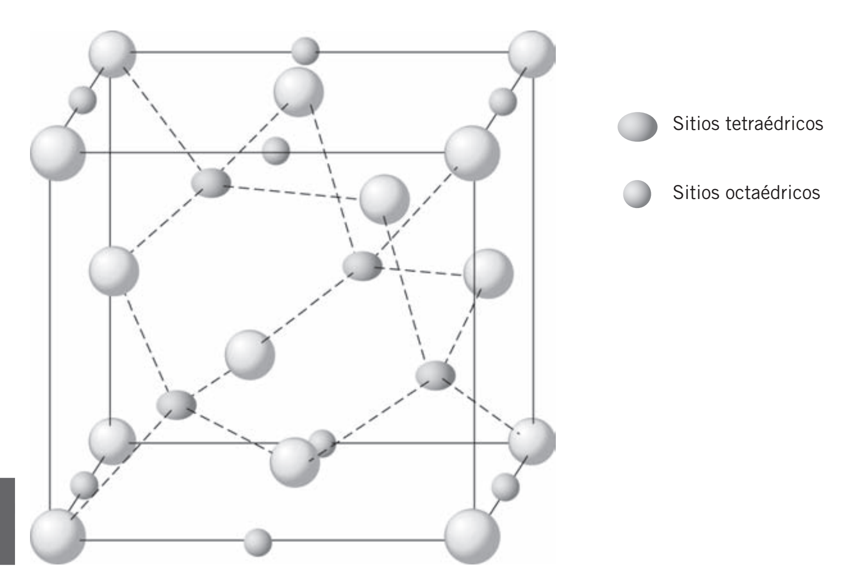


Figura 6-2 Ilustración de las posiciones tetraédricas y octaédricas en una red cristalina FCC

| *Posiciones octaédricas* | Espacios intersticiales entre seis átomos en una red cristalina que forma un octaedro.

| *Estructura del cloruro de sodio* | Sistema de red cristalina en la cual los aniones llenan la cara y los sitios de la esquina en una red cristalina FCC mientras que un número igual de cationes ocupa las regiones intersticiales.

De forma similar, hay ocho ***posiciones octaédricas*** donde seis átomos son igualmente separados del espacio intersticial. En general, los aniones más grandes llenan los planos de paquete cerrado mientras que los aniones más pequeños ocupan los sitios intersticiales.

Uno de los sistemas AX más comunes, la ***estructura del cloruro de sodio*** que se muestra en la figura 6-3, es altamente iónica e involucra números iguales de cationes y aniones. Los aniones Cl^{-} ocupan la esquina y los sitios de la cara en la estructura de la red cristalina FCC, y los cationes Na^{+} ocupan las regiones intersticiales. Debido a que cada catión contacta seis aniones, el número de coordinación de la red cristalina es 6. El óxido ferroso (FeO) y el sulfito de manganeso (MnS) son otros cerámicos comunes junto con la estructura del cloruro de sodio.

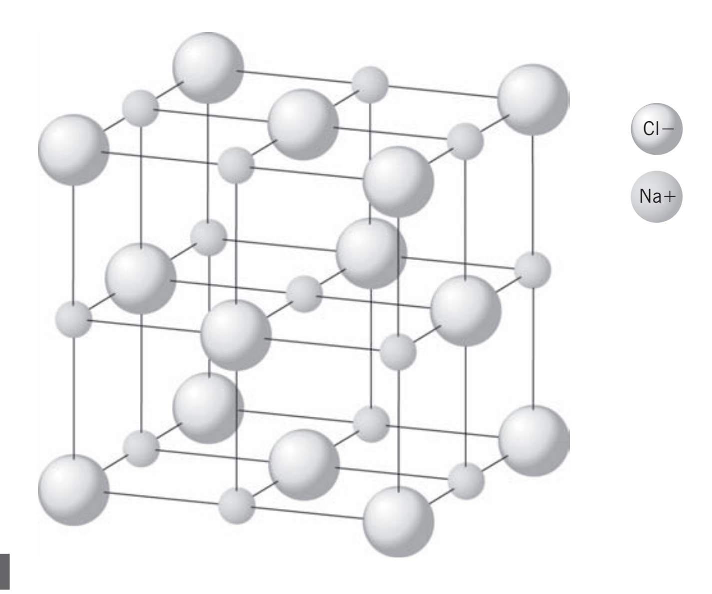


Figura 6-3 Estructura del cloruro de sodio

Ejemplo 6-1

Verificar que un número de coordinación de 6 es válido para un cerámico consistente de iones de Na^+ y Cl^-.

SOLUCIÓN

De la tabla 6-2, el radio iónico de un ión de sodio es 0.102 nm y el de un ión de cloro es 0.181 nm. El coeficiente del catión al anión se vuelve:

$$\frac{r_c}{r_a} = \frac{r_{Na^+}}{r_{Cl^-}} = \frac{0.102\ nm}{0.181\ nm} = 0.56$$

La tabla 6-1 muestra que el rango del coeficiente del radio iónico para un número de coordinación de 6 espacios de 0.414 a 0.732. Ya que 0.56 cae dentro de este rango, 6 es el número de coordinación correcto.

La ***estructura de la blenda de zinc*** es otro sistema AX, pero esta vez cada celda unitaria contiene el equivalente de cuatro aniones y cuatro cationes, como se muestra en la figura 6-4. Existen dos formas equivalentes de la estructura. En una, todas las posiciones de esquina y de cara en la red cristalina FCC están ocupadas por aniones mientras que todos los cationes ocupan las posiciones tetraedrales intersticiales. Una estructura exactamente equivalente resulta si los cationes y los aniones están al revés. Como resultado, cada anión está enlazado a cuatro cationes, resultando en un número de coordinación de 4. Junto con las especies de zinc, la red cristalina del carburo de silicio forma una estructura de blenda de zinc.

| ***Estructura de la blenda de zinc*** |
Sistema de red cristalina FCC con número igual de cationes y aniones en el cual cada anión está enlazado a cuatro cationes idénticos.

Para los sistemas donde el catión y el anión tienen cargas diferentes, un sistema A_mX_p resulta como el que se encontró en la ***estructura del fluoruro de calcio (CaF_2)***, que se muestra en la figura 6-5. La estructura CaF_2 consiste de una red cristalina FCC con iones de calcio que ocupan los sitios de la red cristalina y iones F^- en los sitios tetraedrales. La única característica de la estructura del fluoruro de calcio es que los sitios octaédricos en la red cristalina permanecen desocupados. La ***estructura perovskita***, que se muestra en la figura

| ***Estructura del fluoruro de calcio*** |
Sistema de red cristalina FCC con cationes que ocupan sitios de la red cristalina, aniones en los sitios tetraedrales y los sitios octaedrales se dejan vacantes.

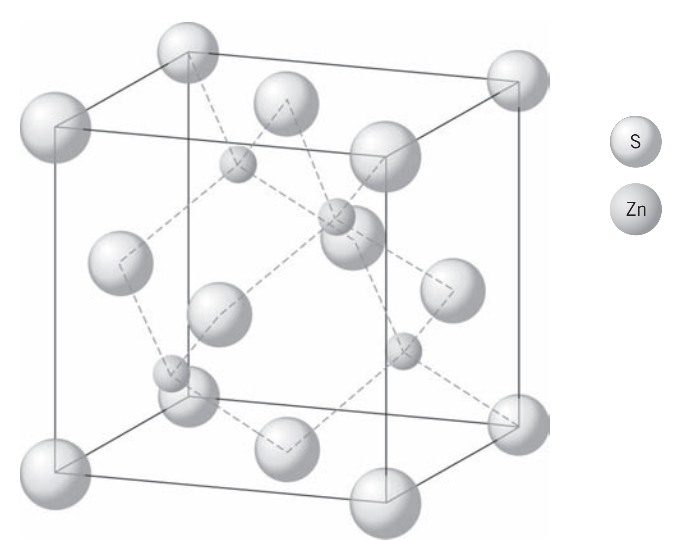


Figura 6-4 Estructura de la blenda del zinc

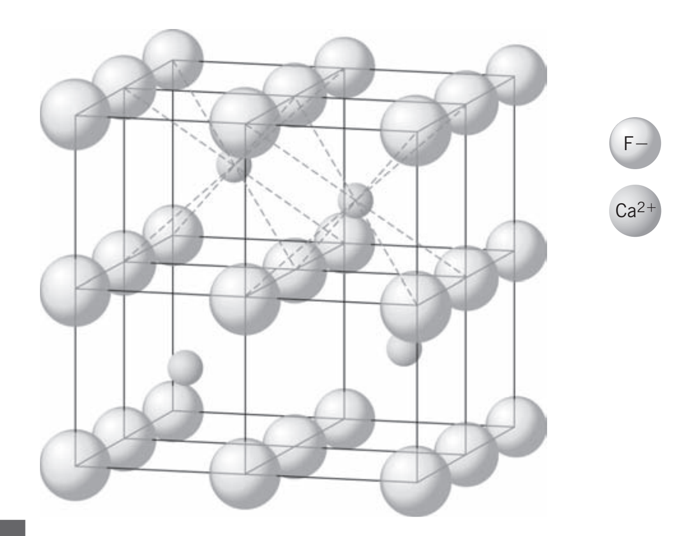


Figura 6-5 Estructura del fluoruro de calcio

Ejemplo 6-2

Calcular el número de coordinación del óxido de uranio.

SOLUCIÓN

De la tabla 6-2, el radio iónico de un ión de U^{4+} es 0.105 nm y de un ión de óxido es de 0.132 nm. El coeficiente del catión al anión se vuelve:

$$\frac{r_c}{r_a} = \frac{r_{U4+}}{r_{O2-}} = \frac{0.105 \text{ nm}}{0.132 \text{ nm}} = 0.795$$

De acuerdo con la tabla 6-1, el coeficiente del radio iónico de 0.795 que corresponde a un número de coordinación de 8.

| ***Estructura perovskita*** |
Sistema de redes cristalinas FCC con dos especies de catión, uno ocupando los sitios de la esquina y el otro ocupando los sitios octaedrales. Una especie de anión ocupa los sitios de la cara en la red cristalina.

| ***Estructura espinela*** |
Sistema de redes cristalinas FCC con dos especies de catión, una ocupa los sitios tetraedrales y la otra ocupa los sitios octaedrales. Una especie de anión ocupa los sitios de la cara y la esquina en la red cristalina.

6-6, proporciona un ejemplo de un sistema $A_mB_nX_p$. En esta estructura, dos aniones con cargas potencialmente diferentes existen en el mismo cerámico como una sola especie de anión. Las perovskitas, como el titanato de bario ($BaTiO_3$) y el titanato de calcio ($CaTiO_3$), generalmente contienen un catión metálico capaz de sostener una carga más grande como el titanio. En estos sistemas, el catión de no titanio ocupa los sitios de la esquina de una red cristalina FCC con los aniones de óxido en los sitios de las caras de la red cristalina. El catión Ti^{4+} llena el sitio intersticial octaédrico. Los materiales con estructura perovskita demuestran propiedades piezoeléctricas que se comentan en el capítulo 8.

La ***estructura espinela***, que se muestra en la figura 6-7, es otro ejemplo de un sistema $A_mB_nX_p$. En este caso, el aluminato de magnesio ($MgAl_2O_4$) forma una red cristalina FCC con los aniones de óxido en los sitios de la esquina y la cara. Los cationes Mg^{2+} llenan los cuatros sitios tetraédricos, mientras que los ocho sitios octaédricos los oupan cationes de Al^{3+}. La estructura espinela es especial por sus propiedades ferromagnéticas.

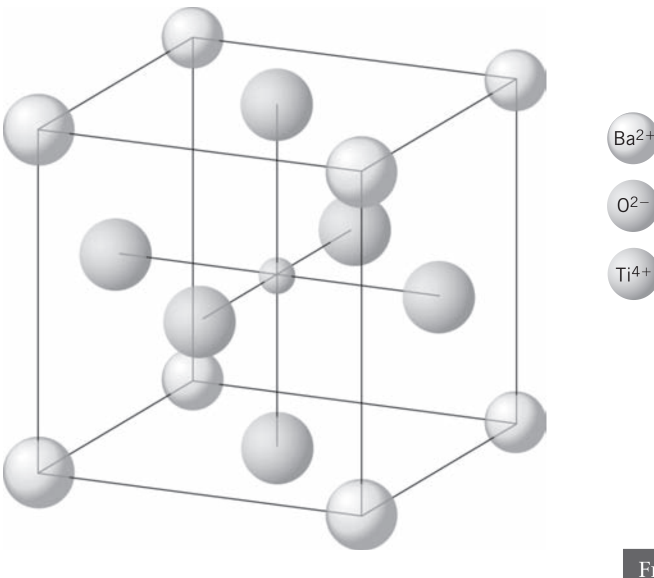


Figura 6-6 Estructura perovskita

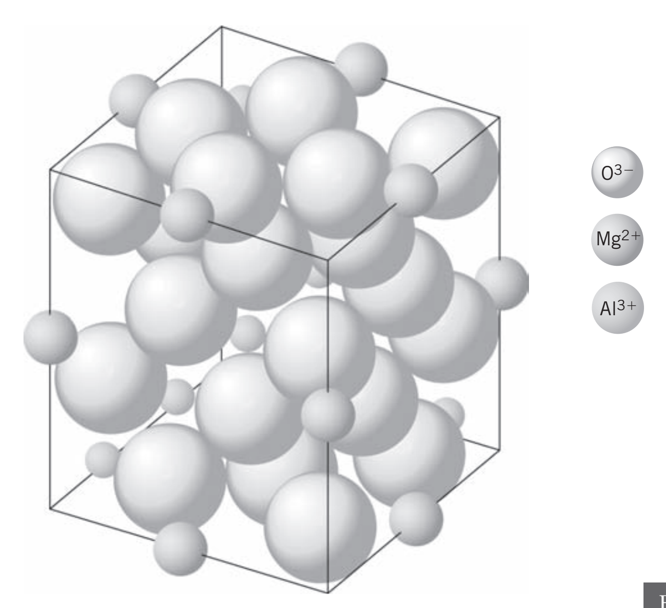


Figura 6-7 Estructura espinela

Los sistemas cerámicos se representan en diagramas de fase igual que los metales. En general, los diagramas de fase cerámicos involucran mezclas de óxidos y/o silicatos. La figura 6-8 muestra un diagrama de fase cerámico típico para la alúmina de óxido de magnesio. Los mismos principios de interpretación del diagrama de fase aplicados a los metales también aplica a los diagramas cerámicos, incluyendo el cálculo de la composición de fase de las líneas de unión y la identificación de líneas de sólidus, líneas de líquidus, líneas de solvus y todos los puntos invariantes.

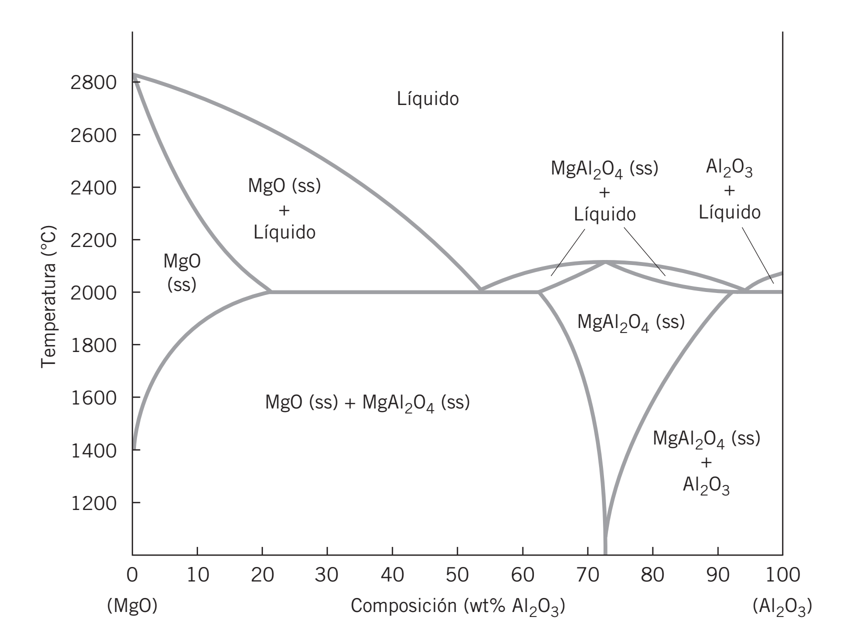


Figura 6-8 Diagrama de fase del $MgO-Al_2O_3$

De B. Hallstedt. "Thermodynamic Assessment of the System $MgO-Al_2O_3$". Journal of the American Ceramic Society, vol. 75, no. 6 (1992): 1502. *Reimpreso con permiso de the American Ceramic Society*

¿Cuáles son los usos industriales de los cerámicos?

La American Ceramic Society clasifica los materiales cerámicos en siete grupos diferentes: abrasivos, vidrios, cementos, refractarios, productos estructurales de arcilla, cerámicos blancos y cerámicos avanzados. Cada categoría posee propiedades y retos distintos.

6.2 ABRASIVOS

| ***Abrasivos*** | Materiales usados para desgastar otros materiales.

Los ***abrasivos*** se utilizan para desgastar otros materiales a través de procesos que incluyen el esmerilado, el lijado, el pulido y el abrasivo a presión. La partícula abrasiva actúa como un instrumento cortante, arrancando parte del material más suave. Por esta razón, la dureza es la característica más importante de un material abrasivo, pero el abrasivo también debe resistir la fractura, así que la tenacidad también es importante. Muchos cerámicos son abrasivos ideales debido a su mezcla de tenacidad y dureza, aunado con suficiente resistencia al calor para aguantar las elevadas temperaturas generadas por la fricción durante los procesos abrasivos.

El producto abrasivo comercial más familiar es la *lija*, en el cual una resina se usa para fijar partículas a un soporte. La lija data del siglo XIII en China, donde pedazos de conchas de mar se pegaban con goma natural a pedazos de pergamino o piel de tiburón. La primera patente estadounidense para la lija data de 1834 e involucró el asegurar pedazos de vidrio al papel. Las lijas modernas han evolucionado más allá del vidrio, y algunas ya no usan papel como soporte. En su lugar, comúnmente se usan los soportes Mylar, el algodón, y el rayón.

Cuatro clases diferentes de abrasivos se utilizan en la lija: la alúmina, el granate, el carburo de silicio y el "cerámico". La alúmina (Al_2O_3) es por mucho el abrasivo para la lija más común y posee muchas propiedades benéficas.

La alúmina es densa (3.97 g/cm^3), tenaz (9 en la escala de dureza Moh), insoluble en agua y tiene un punto de fusión alto (2288K). La alúmina forma una ***estructura corindón***, que se muestra en la figura 6-9, en la cual los iones de Al^{3+}ocupan los sitios octaédricos en la red cristalina hexagonal de paquete cerrado (HCP). Debido a que el sistema debe permanecer eléctricamente neutral, sólo pueden haber dos iones de aluminio por cada tres iones de oxígeno. Como resultado, los iones de aluminio pueden ocupar sólo dos tercios de los lados octaédricos, y la red cristalina se distorsiona ligeramente. El paquete cerrado de los iones de aluminio y oxígeno llevan a una dureza excepcional del material. Muchas gemas son de alúmina con impurezas específicas, incluyendo los rubíes (el Cr^{3+} proporciona el color rojo) y el zafiro (el Fe^{2+} y el Ti^{4+}proporcionan el color azul).

| ***Estructura corindón*** |
Sistema de red cristalina HCP con cationes que ocupan dos tercios de los sitios octaedrales.

Las partículas de alúmina pueden formarse en una variedad de formas y tamaños y son ***friables***, así que forman fragmentos con nuevos bordes filosos cuando se rompen bajo tensión con el calor y la presión. Las partículas de óxido de aluminio en la lija son autorrenovables.

| ***Friable*** |
Formación de bordes filosos cuando se rompen bajo tensión.

El granate [$A_3B_2(SiO_4)_3$] realmente se refiere a una variedad de materiales clasificados como granates de aluminio, granates de cromo o granates de hierro, dependiendo de la identidad del metal B en su estructura. El granate es un material más suave que la alúmina y no es friable, haciéndolo menos adecuado para remover grandes cantidades de material. Los bordes filosos del granate se suavizan durante el proceso de lijado, produciendo una superficie más suave que el óxido de aluminio y sellando el grano de la madera (si la madera fuera el material lijado). Como resultado, la lija de granate típicamente se utiliza en maderas suaves y para un acabado final. Más de 100 000 toneladas de lija de granate se producen al año y se pueden reconocer por su distintivo color naranja.

El carburo de silicio (SiC) es más duro que la alúmina y es friable, aunque la mayoría de la madera no es suficientemente dura para fracturar la superficie de las partículas. La combinación de dureza y resistencia a altas temperaturas hace al SiC ideal para la abrasión de metales, yeso y fibra de vidrio.

Las lijas de cerámico son las más duras y más caras. Las partículas de cerámico se depositan en el soporte con el proceso ***sol-gel*** en el cual las sales de los metales son forzados a una suspensión coloidal, llamada sol, que luego se coloca en un molde. A través de una serie de tratamientos de secado y calor, el sol se convierte en un gel sólido húmedo.

| ***Sol-gel*** |
Material causado por la formación de una suspensión coloidal de sales metálicas luego secadas en un molde dentro de un gel sólido húmedo.

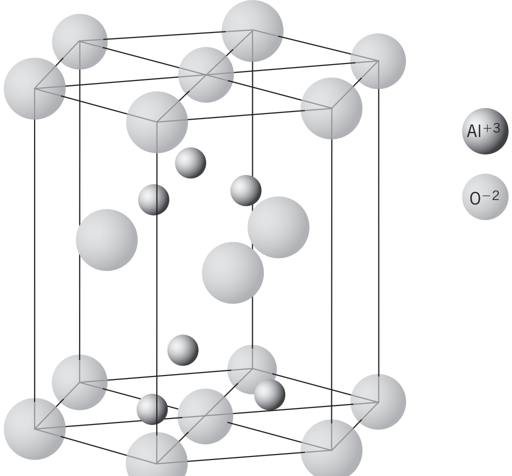
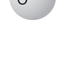



Figura 6-9 Estructura corindón del óxido de aluminio

Tabla 6-3 Tamaños de los granos para lijas

Grano	Grado	Usos
40-60	Grueso	Remoción o lijado a gran escala
80-120	Medio	Suavizante
150-180	Fino	Lijado final de la madera
220-240	Muy fino	Lijado entre capas de manchas
280-320	Extra fino	Remoción de marcas
360-600	Súper fino	Remoción de raspaduras superficiales

El gel se seca más para formar un cerámico extremadamente duro. Las lijas de sol-gel se usan para darle forma y nivel a la madera, y se encuentran típicamente en las lijadoras de banda.

Cualquiera que sea el agente abrasivo, las lijas se clasifican de acuerdo al grano, que es el número de partículas abrasivas por pulgada cuadrada. La tabla 6-3 resume los tamaños, grados y usos de la lija comercial.

La lija se clasifica como un abrasivo revestido debido a que las partículas están unidas a un soporte flexible, pero en procesos y productos comerciales se usan otras formas de abrasivos. Los abrasivos para pulido son partículas extremadamente finas utilizadas en el pulimento fino. Típicamente, los abrasivos para pulido se venden como polvo seco o en pasta que se aplica con agua a una rueda giratoria. El elemento a pulir se mueve gentilmente de atrás hacia adelante contra la rueda cubierta. El polvo de diamante es el abrasivo para pulido más duro. Los abrasivos compuestos fusionan partículas de cerámico duro con un material de ligadura que permite que sean prensados en formas útiles, incluyendo ruedas, cilindros, bloques y conos para esmerilado. La técnica primaria usada para formar abrasivos de unión es el ***prensado*** o ***compactación***.

| ***Prensado o compactación*** | Formación de un material sólido mediante la compactación de partículas bajo presión.

A diferencia de los polímeros y los metales, a la mayoría de los cerámicos no se les puede dar forma al fundir el material y vaciarlo en un molde. En su lugar, las partículas de cerámico se mezclan con un agente de ligadura (usualmente agua), que lubrica las partículas durante la compactación y son forzadas a tomar forma mediante presión. En el *prensado uniaxial*, la forma más sencilla, el polvo de cerámico se comprime en un troquel metálico mediante presión en una sola dirección. Como resultado, el material compactado toma la forma del troquel y el molde. Cuando se requiere una forma más complicada, el material cerámico se pone en una cámara de plástico y se aplica agua para un *prensado isotáctico,* significativamente más caro que el prensado uniaxial.



Aunque la presión fusiona las partículas, es necesario un proceso de sinterización para mejorar la fuerza del objeto prensado. Durante la sinterización, el objeto prensado se calienta, provocando que las fronteras de grano entre las partículas se unan. La región intersticial entre las partículas se empieza a encoger y gradualmente se desarrolla como poros pequeños y esféricos como se muestra en la figura 6-10.

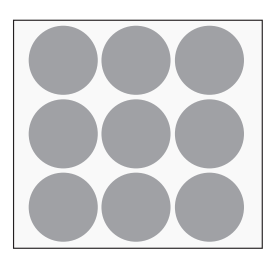
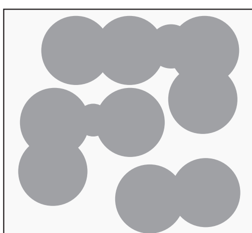
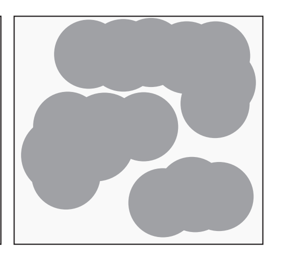




Figura 6-10
Cambios microestructurales resultantes de la sinterización

6.3 VIDRIOS

Los *vidrios* difieren de la mayoría de los materiales sólidos debido a que no presentan una estructura cristalina. Aunque los materiales vítreos pueden hacerse a partir de un número de óxidos de metal, el ***vidrio de sílice*** es por mucho el más común. Irónicamente, el vidrio de sílice no cristalino está hecho de un material cristalino, el dióxido de silicio (SiO_2), que sucede en una variedad de formas alotrópicas dependiendo de la temperatura y la vía de formación. El diagrama de fase para el SiO_2 se muestra en la figura 6-11. La estructura cristalina más común para el SiO_2 es el cuarzo (o cuarzo α), una estructura trigonal. Cuando el cuarzo se calienta a 573º C, se transforma en una red cristalina hexagonal y se convierte en cuarzo β (o cuarzo alto). A medida que la temperatura se incrementa a 867º C, el SiO_2 se transforma otra vez, esta vez en una red cristalina hexagonal llamada ***tridimita***, la cual después se convierte a ***cristobalita*** cúbica a 1713º C.

Aunque en particular no hay nada inusual acerca del calentamiento del cuarzo para formar SiO_2 líquido, el comportamiento del material cuando se enfría es un poco diferente. Mientras el SiO_2 fundido se enfría, el diagrama de fase indica que la cristobalita debería formarse. Sin embargo, la viscosidad extremadamente alta del SiO_2 fundido previene a las moléculas tetraedrales del SiO_2 de rearreglarse en una estructura cristalina. Mientras el líquido continúa enfriándose, forma un vidrio amorfo en lugar de la estructura cristalina de cristobalita termodinámicamente favorecida.

A diferencia de los metales, el vidrio no se transforma directamente de líquido a sólido rígido. En su lugar, se somete a una transición de un líquido altamente viscoso a un semisólido que se hace rígido sólo cuando alcanza la temperatura de transición vítrea. Igual que en los polímeros, la temperatura de transición vítrea representa el punto en el que el movimiento molecular a gran escala se hace posible. Cuando un vidrio es calentado por arriba de la temperatura de transición vítrea, desarrolla movimiento a gran escala a través de un proceso llamado ***vitrificación***.

La unidad básica del vidrio es un tetraedro de SiO_4^{4-}, como el que se muestra en la figura 6-12. En este arreglo, cada átomo de silicio se posa en el centro de un tetraedro con un átomo de oxígeno en cada esquina. Los enlaces entre los átomos de silicio y oxígeno contienen características iónicas y covalentes. Una ***red flexible*** se forma como la que se muestra en la figura 6-13 con los tetraedros tocándose de esquina a esquina sin orden de rango largo.

Para reducir la viscosidad de estas redes flexibles, los óxidos de metal llamados ***modificadores de red*** frecuentemente se añaden a la mezcla. Los modificadores de red comunes incluyen Na_2O, K_2O y MgO. Los átomos de oxígeno de estos óxidos rompen la red flexible al ocupar un sitio tetraedral. Se pueden añadir otros óxidos que no pueden formar su propia red pero que se pueden unir a una red flexible existente de tetraedros de SiO_4^{4-}. Estos compuestos se llaman ***óxidos intermediarios*** y generalmente se utilizan para impartir propiedades especiales al vidrio. Por ejemplo, los vidrios de silicato de aluminio pueden soportar temperaturas más altas, mientras que la adición de óxido de plomo incrementa el índice de refracción, haciendo al vidrio más lustroso e ideal para cristalería, ventanas o joyería. Los decantadores de vino de plomo-vidrio, como el que se muestra en la figura 6-14, fueron populares hasta finales de los años ochenta, cuando se descubrió que las bebidas alcohólicas podrían absorber algo del plomo a partir del vidrio.

La mayoría de los vidrios se componen de una red flexible de tetraedros de SiO_4^{4-}, modificadores de red y óxidos intermediarios. El ***vidrio de sosa-cal***, la

| ***Vidrios*** |
Sólidos inorgánicos que existen en forma rígida pero no cristalina.

| ***Vidrio de sílice*** |
Sólido no cristalino formado del enfriamiento del dióxido de silicio (SiO_2) fundido.

| ***Tridimita*** |
Polimorfo de dióxido de silicio (SiO_2) de alta temperatura que presenta una red cristalina hexagonal.

| ***Cristobalita*** |
Polimorfo de dióxido de silicio (SiO_2) de alta temperatura que exhibe una red cristalina cúbica.

| ***Vitrificación*** |
Proceso térmico en el que un sólido vidrioso desarrolla un movimiento a gran escala.

| ***Red flexible*** |
Arreglo molecular en los vidrios en el que no hay orden de rango largo pero los tetraedros adyacentes SiO_4^{4-} comparten un átomo de oxígeno de esquina.

| ***Modificadores de red*** |
Aditivos utilizados para reducir la viscosidad de redes flexibles en los vidrios.

| ***Óxidos intermediarios*** |
Aditivos utilizados para impartir propiedades especiales a los vidrios.

| ***Vidrio de sosa-cal*** |
La composición de vidrio más común que incluye dióxido de silicio (72%), sosa (14%) y cal (7.9%) como constituyentes principales.

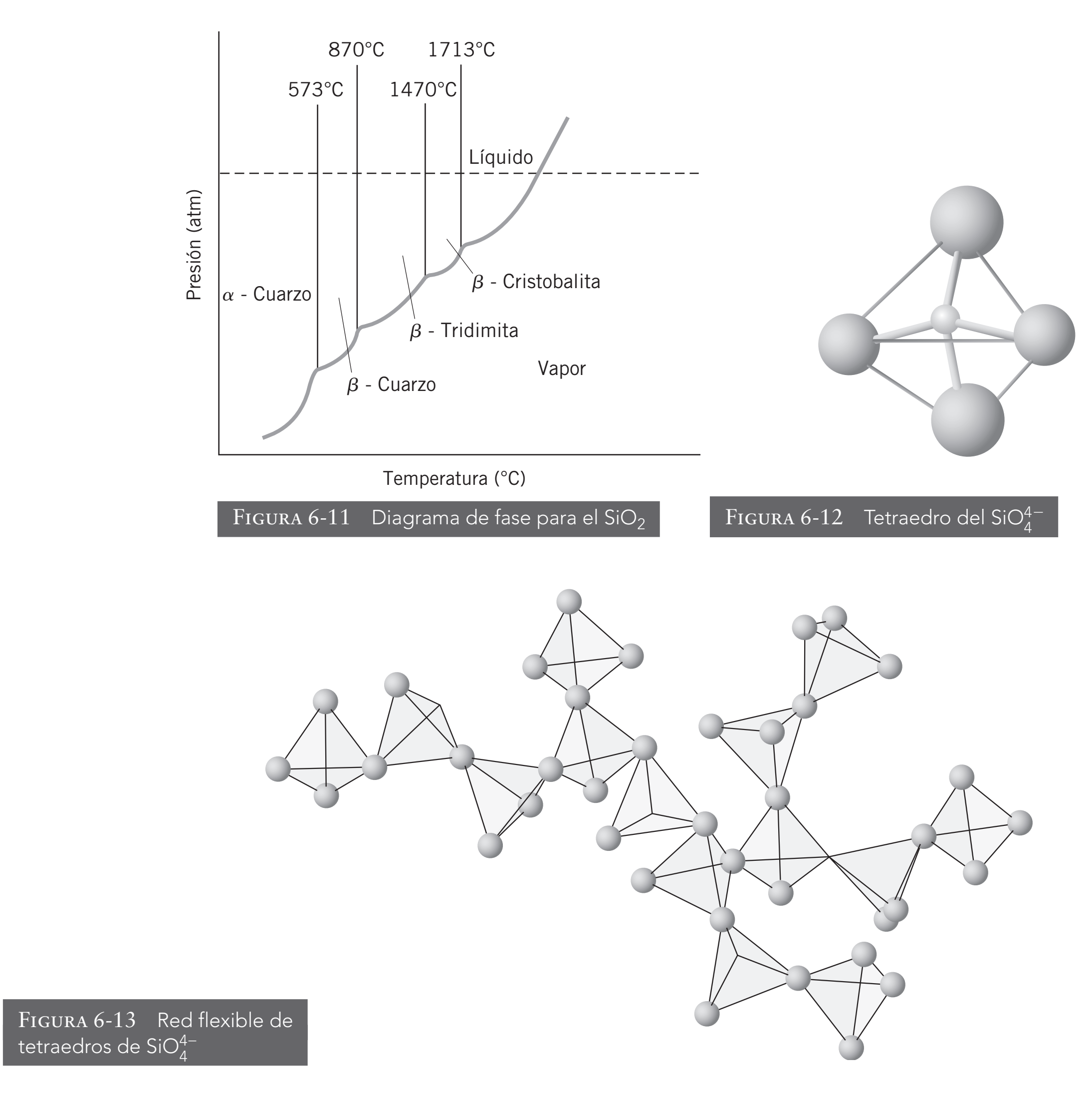


Figura 6-11 Diagrama de fase para el SiO_2

Figura 6-12 Tetraedro del SiO_4^{4-}

Figura 6-13 Red flexible de tetraedros de SiO_4^{4-}

formulación más común, consiste de 72% de SiO_2, 14% de sosa (N_2O), 7.9% de cal (CaO), 1.8% de alúmina (Al_2O_3), 1% de óxido de litio (Li_2O), 1% de óxido de zinc (ZnO) y menos de 1% de óxido de bario (BaO), 1% de óxido de potasio (K_2O) y 1% de óxido de antimonio (Sb_2O_3).

La otra razón para incluir aditivos específicos a los vidrios es alterar su color. Cuando están libres de impurezas, los vidrios de sílice son incoloros. Al añadir pigmentos específicos de óxido metálico a la mezcla, los fabricantes de vidrios pueden crear un vidrio transparente o traslúcido con colores llamativos. La tabla 6-4 resume los aditivos para vidrios específicos. El más llamativo en esta lista es el óxido de uranio, que se muestra en la figura 6-15, el cual produce un vidrio verde/amarillo (frecuentemente llamado vidrio Vaselina) que brilla en la oscuridad. En los años cuarenta, el uso del óxido de uranio estaba prohibido en la fabricación de vidrio, ya que el gobierno quería controlar el acceso al uranio, y debido a asuntos relacionados con la salud de los trabajadores del vidrio. A finales de los años cincuenta estas restricciones fueron eliminadas, pero el alto costo del óxido de uranio hace de su uso algo prohibitivamente caro para la mayoría de la cristalería.



Figura 6-14 Decantador de vino de plomo-vidrio

Cortesía de James Newell

Más de 80% de todo el vidrio comercial se produce a través del ***proceso del vidrio flotado*** que se muestra en la figura 6-16, desarrollado por Sir Alastair Pilkington en 1959. En este proceso, los constituyentes para el vidrio son fundidos en un horno a 1500º C. Un listón fino de vidrio se envía desde un horno y luego flota en la parte superior de una alberca de estaño fundido. El vidrio viscoso y el estaño fundido son completamente inmiscibles, así es que una superficie perfectamente suave se forma entre el vidrio y el estaño. Cuando la superficie del vidrio se ha endurecido lo suficiente, los rodillos jalan el vidrio a través de un horno de recocido llamado ***Lehr***. Mientras está en el Lehr, el vidrio es lentamente enfriado para remover cualquier tensión residual y se aplica cualquier cubierta.

| ***Proceso del vidrio flotado*** | Técnica de producción de vidrio en la que un listón fino de vidrio se envía desde un horno y luego flota en la superficie de una alberca de estaño fundido.

| ***Lehr*** | Horno de recocido utilizado en la fabricación del vidrio.

Tabla 6-4 Aditivos para vidrios con color

Color	*Aditivo(s)*
Ámbar	Óxidos de manganeso
Negro	Óxidos de manganeso, cobre y hierro
Azul claro	Óxidos de cobre
Azul oscuro	Óxidos de cobalto
Verde	Óxidos de hierro
Verde-amarillo	Óxidos de uranio
Rojo	Óxidos de selenio
Blanco	Óxidos de estaño
Amarillo	Plomo y antimonio



Figura 6-15 Vidrio Vaselina (contiene óxido de uranio)

Cortesía de James Newell

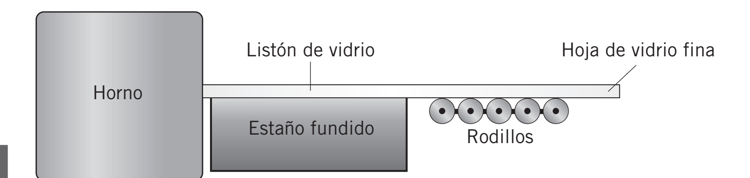


Figura 6-16 Proceso del vidrio flotado

| ***Cemento*** |
Cualquier material capaz de aglutinar cosas.

| ***Cementos hidráulicos*** |
Materiales aglutinantes que requieren agua para formar un sólido.

| ***Cementos no hidráulicos*** |
Materiales aglutinantes que forman un sólido sin necesidad de agua.

| ***Cemento Portland*** |
El cemento hidráulico más común hecho de silicatos de calcio pulverizados sinterizados.

| ***Concreto*** |
El compuesto particulado comercial más importante, que consiste de una mezcla de grava o piedra triturada y cemento Portland.

6.4 CEMENTOS

Aunque la palabra ***cemento*** es de hecho un término genérico que se refiere a cualquier material capaz de aglutinar cosas, desde una perspectiva de materiales el término significa ya sea ***cementos hidráulicos***, los cuales requieren agua para formar un sólido, o ***cementos no hidráulicos***, los cuales forman sólidos sin necesidad de agua.

El cemento hidráulico más común, el ***cemento Portland***, está hecho de nódulos pulverizantes de silicatos de calcio sinterizados. Debido a que estos silicatos de calcio son abundantes en la caliza, gis, depósitos de concha y esquisto, el cemento Portland es uno de los materiales de construcción más barato disponible. El uso más común del cemento Portland es como la matriz de un material para el material de construcción casi ubicuo ***concreto***, un compuesto de partículas que se comenta en el capítulo 7. 

El cemento Portland puede producirse ya sea a través de un proceso seco o húmedo, en donde el proceso seco requiere más energía. En cualquiera de los procesos, se pone en la tierra una fuente de carbonato de calcio y se mezcla con cuarzo (SiO_2) y una arcilla o limo que proporciona Fe_2O_3 y Al_2O_3 a la mezcla. Debido a la prevalencia de distintos hierros, aluminios, óxidos de calcio y silicatos, se desarrolló un sistema estándar de nomenclatura abreviada. Esta

TABLA 6-5 Nomenclatura taquigráfica para los constituyentes del cemento Portland

Abreviación	*Compuesto*
A	Al_2O_3
C	CaO
F	Fe_2O_3
H	H_2O
S	SiO
$\overline{S}$	SO_3

notación taquigráfica se resume en la tabla 6-5 y se utiliza a lo largo de esta sección. Cuando existe más de un compuesto, las proporciones se expresan como subíndices, de tal forma que un compuesto con 3 moles de CaO para cada mol de Al_2O_3, se abreviaría como C_3A.

Las partículas mezcladas se alimentan a un horno giratorio, comenzando un proceso de cuatro etapas que incluye *evaporación-deshidratación, calcinación, clinkerización* y enfriamiento. Durante la etapa de ***evaporación-deshidratación***, la mezcla se calienta entre 250° C y 450° C para secar toda el agua libre. Mientras el calentamiento continúa a alrededor de 600° C, cualquier agua vinculada a los óxidos y silicatos es removida. A los 900° C comienza el proceso de ***calcinación***, en el que el carbonato de calcio se convierte a óxido de calcio y se libera el dióxido de carbono, como se muestra en la ecuación 6.1:

| ***Evaporación-deshidratación*** |
Primera etapa en el procesamiento del cemento Portland en el que se saca toda el agua libre.

| ***Calcinación*** |
La segunda etapa en el procesamiento del cemento Portland en el que el carbonato de calcio se convierte a óxido de calcio.

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \quad (6.1)$$

En el mismo rango de temperatura, el óxido de calcio (C) reacciona con el óxido de aluminio (A) y el óxido ferroso (F) para formar aluminoferrita tetracálcica (C_4AF) y aluminato tricálcico (C_3A) como se muestra en las ecuaciones 6.2 y 6.3:

$$4C + A + F \rightarrow C_4AF \quad (6.2)$$
$$3C + A \rightarrow C_3A \quad (6.3)$$

Mientras la temperatura del horno se incrementa a alrededor de 1450° C, comienza la fase de ***clinkerización***, y el óxido de calcio remanente reacciona con los silicatos del cuarzo para formar silicato dicálcico (C_2S) y silicato tricálcico (C_3S), como se muestra en las ecuaciones 6.4 y 6.5:

| ***Clinkerización*** |
Tercera etapa en el procesamiento del cemento Portland en el que se forman los silicatos de calcio.

$$2C + S \rightarrow C_2S \quad (6.4)$$
$$3C + S \rightarrow C_3S \quad (6.5)$$

El producto que emerge del horno se llama *clinker* y consiste de una distribución de partículas que promedian alrededor de 10 mm en diámetro. El clinker pasa a través de una fase de enfriamiento, entonces es enviado a un molino de bolas en donde es aterrizado con 5% de yeso pulverizado ($C\overline{S}H_2$) hasta que la mezcla resultante logra un tamaño de partículas promedio de aproximadamente 10 μm, con un rango de alrededor de 1 μm a 100 μm. La tabla 6-6 resume la composición típica del cemento Portland.

Tabla 6-6 Composición del cemento Portland Compuesto

Compuesto	*Abreviación*	*Porcentaje de masa*
Silicato tricálcico	C_3S	55
Silicato dicálcico	C_2S	20
Aluminato tricálcico	C_3A	10
Aluminoferrita tetracálcica	C_4AF	8
Yeso	CSH_2	5

La composición exacta del cemento Portland puede ser variada para hacerlo más adecuado para aplicaciones específicas. La tabla 6-7 resume los diferentes tipos de cemento Portland y las aplicaciones para las que es adecuado. Los tipos I y II cuentan por más del 90% de todos los cementos Portland.

| ***Pasta de cemento*** | Mezcla de partículas de cemento y agua.

Las partículas de cemento Portland se guardan en condiciones secas hasta que son necesarias. Cuando llega el momento de construir la estructura de cemento, las partículas de cemento se mezclan con agua para formar una ***pasta de cemento*** y comienza una serie de reacciones de hidratación que desarrollan las propiedades finales del cemento sólido. Los silicatos de calcio (C_3S y C_2S) hacen tres cuartos de la masa total y proporcionan la mayoría de la fuerza en el cemento. Los silicatos de calcio se someten a reacciones altamente exotérmicas con agua para formar hidratos de silicato de calcio (C-S-H) e hidróxido de calcio (CH), como se resume en las ecuaciones 6.6 y 6.7:

$$2C_3S + 7H \rightarrow C_3C_2H_8 + 3CH \tag{6.6}$$
$$2C_2S + 5H \rightarrow C_3S_2H_8 + CH \tag{6.7}$$

Los hidratos de silicato de calcio son partículas amorfas que son extremadamente pequeñas e incluyen una variedad de composiciones, así es que la designación usada C-S-H no implica un radio exacto entre los constituyentes.

Las reacciones del silicato de calcio suceden en cinco etapas diferentes. La etapa 1 sucede durante los primeros minutos después de que el agua se mezcla con el cemento. Los iones de calcio e hidróxido son liberados del C_3S, resultando en la generación de calor y un aumento rápido del pH. El CH y el C-S-H también comienzan a cristalizarse en la etapa 1. Después de aproximadamente 15 minutos, el cemento entra a un periodo inactivo (etapa 2) durante el cual la reacción se hace lenta. Una cubierta de C-S-H se desarrolla en la superficie del

Tabla 6-5 Tipos de cemento Portland

Tipo	*Propiedades especiales*
I	Uso general
II	Algo de resistencia al sulfato
III	Gana fuerza muy rápido
IV	Calor de hidratación bajo (importante en grandes estructuras)
V	Alta resistencia al sulfato
IA	Tipo I con arrastre de aire mezclado
IIA	Tipo II con arrastre de aire mezclado
IIIA	Tipo III con arrastre de aire mezclado

cemento, la cual crea una barrera de difusión para el agua. Mientras el grosor aumenta, la velocidad de reacción se vuelve incrementadamente controlada por la difusión. Después de 2-4 horas se logra una masa crítica de iones y la velocidad de reacción (etapa 3) se acelera. Durante la etapa 3, el C_3S y el menos reactivo C_2S se hidratan rápidamente. Después de alrededor de 8 horas, la velocidad de reacción se desacelera y la difusión controla por completo todas las velocidades (etapa 4). Finalmente, una etapa estable (etapa 5) sucede, en la que la hidratación es esencialmente independiente de la temperatura.

Al mismo tiempo, el aluminato tricálcico (C_3A) también se somete a una reacción de hidratación. Sin el yeso, el C_3A reaccionaría rápidamente con el agua, provocando el ajuste prematuro y propiedades menos deseables. En su lugar, el C_3A reacciona con el yeso para formar hidrato de sulfoaluminato de calcio (etringita), como se muestra en la ecuación 6.8:

$$\begin{array}{ccccccccc} C_3A & + & 3CSH_2 & + & 26H & \rightarrow & C_6AS_3H_{32} \\ \text{calcio aluminato} & + & \text{yeso} & + & \text{agua} & \rightarrow & \text{etringita} \end{array} \quad (6.8)$$

La etringita forma una barrera de difusión alrededor del aluminato de calcio y hace más lenta la reacción de hidratación. Una vez que el yeso se ha consumido, la etringita reacciona con el aluminato tricálcico para formar monosulfoaluminato (C_4ASH_{12}), como se muestra en la ecuación 6.9:

$$2C_3A + C_6AS_3H_{32} + 4H \rightarrow C_4ASH_{12} \quad (6.9)$$

El monosulfoaluminato es estable en el cemento, pero hace al cemento vulnerable al ataque de iones de sulfato. El monosulfoaluminato reaccionará para formar etringita adicional en la presencia de los iones de sulfato. La nueva etringita provoca una expansión dentro del cemento que puede resultar en el agrietamiento.

La aluminoferrita tetracálcia (C_4AF) tiene la misma vía de reacción que el C_3A, pero debido a que es menos reactiva, muy poco del yeso reacciona con ésta. En vez de esto, la mayoría de la C_4AF reacciona con el hidróxido de calcio formado en la hidratación de C_2S y C_3S.

Para el momento en que la pasta de cemento ha endurecido, ésta consiste la mayor parte de C-S-H, C-H y C_4ASH_{12} con alrededor de 5% de silicatos no hidratados, como se resume en la tabla 6-8. El C-S-H cuenta entre 50% y 70% del total del volumen y proporciona mucha de la fuerza. Mientras las cubiertas de C-S-H crecen en los granos del C_3S y del C_2S, comienzan a radiar hacia afuera como espigas. La hidratación continua hace que las espigas formen partículas adyacentes para enclavar y conectar físicamente los granos de cemento, como se muestra en la figura 6-17. Los microporos presentes en la estructura C-S-H reducen su fuerza, pero como el agua de estos poros se pierde durante el secado, el cemento se contrae y se hace más fuerte.

El hidróxido de calcio (CH) forma placas cristalinas gruesas incrustadas en la matriz de C-S-H más grande como se muestra en la figura 6-17. Estas placas crecen en poros, reduciendo así la porosidad total del cemento e incrementando su fuerza. El CH también protege la solución, permitiéndole mantener un pH alcalino. La solubilidad del CH en el agua provoca que se filtre lentamente afuera del cemento y puede resultar en una porosidad incrementada y una durabilidad reducida. El monosulfoaluminato juega un rol pequeño en el reforzamiento del concreto pero llena algunos espacios porosos. El C_4ASH_{12} forma delgadas placas irregulares.

Tabla 6-8 Composición del cemento Portland Compuesto

Componente	*Fracción de volumen*	*Densidad (kg/m3)*	*Microestructura*
C-S-H	0.50-0.70	2000	Espigas radiantes entremezcladas de sólidos porosos
CH	0.20-0.25	2250	Placas cristalinas gruesas
$C4A\bar{S}H12$	0.10-0.15	1950	Placas cristalinas delgadas, irregulares agrupadas 10
Silicatos no hidratados	>0.05	3150	Aún posee su estructura de grano original

La porosidad también juega un rol importante en la fuerza de los cementos. Los ***poros capilare***s son los espacios abiertos entre los granos, mientras que los ***poros de gel*** son espacios dentro del material C-S-H. La mayoría de la porosidad del cemento sucede como poros de gel.

| ***Poros capilares*** | Espacios abiertos entre los granos.

| ***Poros de gel*** | Espacios dentro del material C-S-H durante la hidratación del cemento.

Mucha de la investigación actual en la producción del cemento involucra el uso de subproductos industriales, incluyendo cenizas volantes y escoria de altos hornos. En adición al beneficio ecológico de reutilizar estos productos de desperdicio, las cenizas volantes y la escoria frecuentemente mejoran la durabilidad del cemento y reducen el calor de la hidratación debido a que la forma esférica de las partículas reduce la fricción interna. El cemento fluye con menos agua y hay menos segregación.

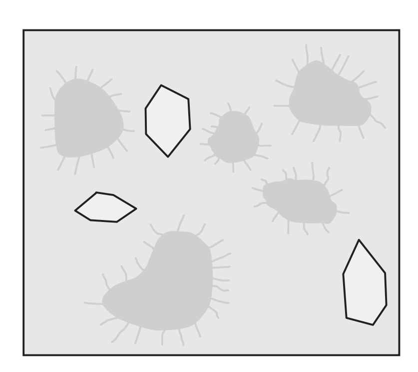
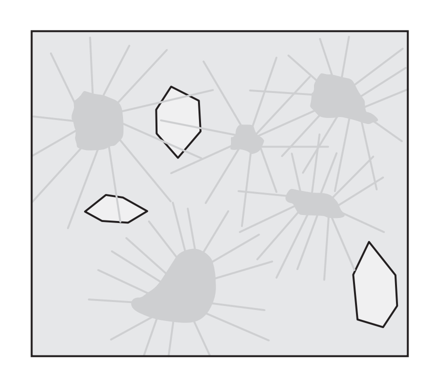
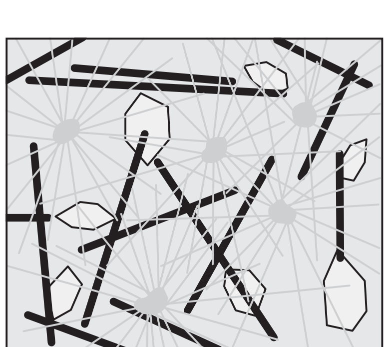
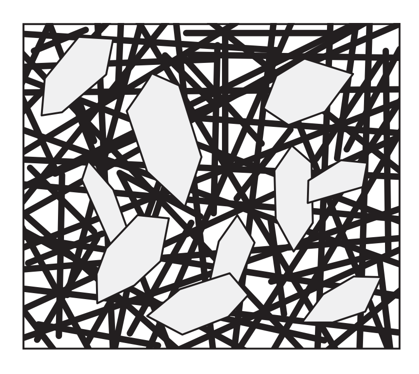






Figura 6-17 Microestructura de pastas de cemento endurecidas

6.5 REFRACTARIOS

Los *refractarios* son capaces de soportar altas temperaturas sin fundirse, degradarse o reaccionar con otros materiales. Esta combinación de propiedades hace a los cerámicos refractarios ideales para los hornos de alta temperatura necesarios para fundir vidrio, metal y otros materiales. La industria del hierro y el acero utiliza sola más de la mitad de todos los cerámicos refractarios producidos en Estados Unidos. Más comúnmente, los refractarios se venden como ladrillos, pero también pueden encontrarse como pizarrones, sábanas o en formas especialmente hechas.

| *Refractarios* | Materiales capaces de soportar altas temperaturas sin fundirse, degradarse o reaccionar con otros materiales.

Los cerámicos refractarios se dividen en dos tipos básicos: ***arcilla*** (que contiene al menos 12% de SiO_2) y no arcilla. El refractario de arcilla más común es la ***arcilla refractaria***, hecha de ***caolinita***, principalmente una mezcla de alúmina (Al_2O_3) y sílice (SiO_2) que se comenta a mayor detalle en la sección 6.7. El diagrama de fase de alúmina-sílice se muestra en la figura 6-18. La arcilla refractaria puede contener entre 50% a 70% de sílice, con 25% a 45% de alúmina. Los constituyentes menores, incluyendo CaO, Fe_2O_3, MgO y TiO_3 se combinan para contar al menos en 5% del material total. Como se vio en el diagrama de fase de la figura 6-18, la arcilla refractaria en este rango puede soportar temperaturas tan altas como 1587° C sin fundirse. Cuando se desean fracciones de alúmina por encima de 50%, la bauxita sirve como el material base. La presencia del sílice ayuda a hacer al refractario resistente al ataque de ácidos.

| *Arcilla* | Material refractario que contiene al menos 12% de dióxido de silicio (SiO_2).

| *Arcilla refractaria* | Material de arcilla que contiene de 50% a 70% de sílice y 25% a 45% de alúmina.

| *Caolinita* | Mineral de arcilla nombrado así por la región Gaolin en China en donde fue descubierto.

Cuando se desean concentraciones de alúmina extremadamente altas (más de 88%), se utilizan ladrillos de ***mullita***. Estos ladrillos son los más estables térmicamente pero se consideran refractarios de no arcilla. Los ladrillos de mullita no se comienzan a fundir hasta temperaturas de 1890° C. Otros refractarios de no arcilla incluyen ladrillos de sílice que contienen sílice con 3% a 3.5% de CaO, y ***periclasa***, los cuales contienen por lo menos 90% de óxido de magnesio (MgO). Estos refractarios de periclasa son especialmente resistentes al ataque de materiales alcalinos y encuentran uso relevante en la industria del acero.

| *Mullita* | Mineral de arcilla formado por aluminosilicatos de alta temperatura.

| *Periclasa* | Material refractario que contiene al menos 90% de óxido de magnesio (MgO).

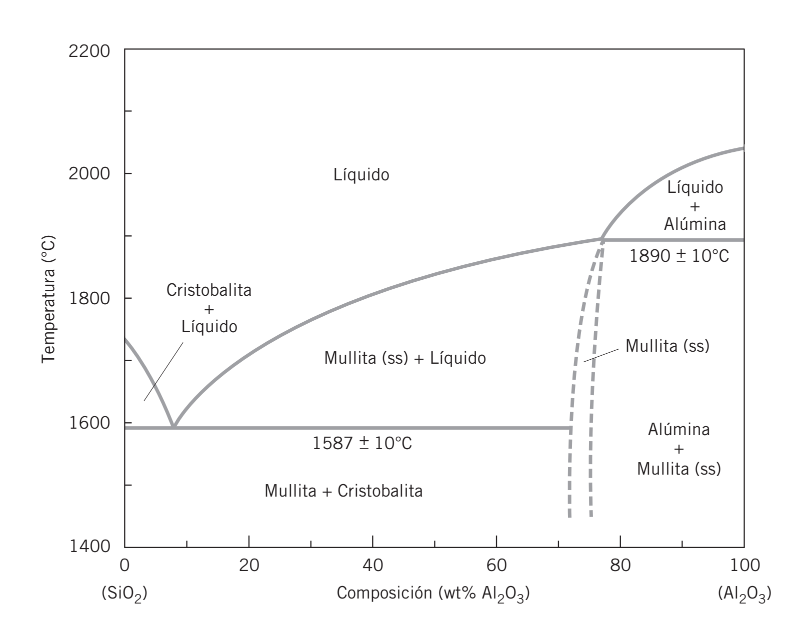


Figura 6-18 Diagrama de fase de la alúmina-sílice

De F. J. Klug, S. Prochazka y R. H. Doremus, "Alumina-Silica Phase Diagram in the Mullite Region", Journal of the American Ceramic Society, *vol. 70, no. 10 (1987): 758. Reimpreso con el permiso de la American Ceramic Society.*



FIGURA 6-19 El ejército de terracota

6.6 PRODUCTOS ESTRUCTURALES DE LA ARCILLA

| ***Productos estructurales de la arcilla*** | Cualquier material cerámico utilizado en la construcción de edificios, incluyendo ladrillos y terracota.

| ***Terracota*** | Material cerámico hecho con arcilla rica en óxido ferroso que se reconoce por su color rojizo-naranja.

Los ***productos estructurales de la arcilla*** incluyen cualquier material cerámico utilizado en la construcción de edificios y más comúnmente involucran ladrillos y terracota, la cual es fácilmente reconocible por su color rojizo naranja. La ***terracota***, que literalmente significa tierra quemada, fue utilizada en la loza de barro desde hace tanto tiempo como el año 3000 a.C., y en la escultura desde hace tanto tiempo como el siglo III a.C., con el ejército de terracota en China como se muestra en la figura 6-19. En Estados Unidos, la terracota se hace de una arcilla Redart que contiene alrededor de 7% de óxido ferroso junto con 64% de sílice, 16% de alúmina, 4% de óxido de potasio y una mezcla de otros óxidos metálicos.



La integridad estructural es el factor crítico en los productos estructurales de la arcilla, especialmente el ladrillo. En Estados Unidos los ladrillos estándar varían de 2.75 a 4 pulgadas de altura, 4 a 6 pulgadas de grosor y 8 a 12 pulgadas de ancho. Cerca de 75% de los $2 mil millones de dólares del valor de los ladrillos vendidos cada año se utilizan en construcciones de casas y edificios. Los ladrillos se forman calentando arcilla seca en un horno. Después son clasificados en ladrillos comunes y ladrillos de cara, son químicamente idénticos, pero los ladrillos de cara tienen una apariencia uniforme que los hace apropiados para las fachadas.

6.7 CERÁMICOS BLANCOS

| ***Cerámico blanco*** | Cerámicos de fina textura usados en vajillas, pisos, azulejos de pared y esculturas.

| ***Porcelana*** | Cerámico blanco traslúcido debido a la formación de vidrio y mullita durante el proceso de cocción.

Los ***cerámicos blanco***s son de textura fina y se utilizan en vajillas, pisos y azulejos de pared y esculturas. La ***porcelana*** es quizá la forma más familiar de los cerámicos blancos, pero de hecho la porcelana comprende un amplio rango de composiciones de material. La caolinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) es el material primario en la porcelana, pero también puede contener vidrio, cenizas de huesos (fosfato de calcio) y esteatita (forma vidriosa del talco). La porcelana china también contiene un material conocido como ***piedra china***, el cual es una mezcla de cuarzo y sericita (mica de grano pequeño).

La caolinita es la arcilla más común; casi todos los depósitos de arcilla contendrán algunas partículas traslúcidas de caolinita. El nombre *caolinita* viene del pueblo de Gaolin, China, en donde existe un gran depósito. La caolinita sólo forma cristales microscópicos con una dureza Moh de entre 1.5 y 2.

| ***Piedra china*** |
Mezcla de cuarzo y mica utilizada para hacer porcelana china.

Típicamente, la fabricación de cerámico blanco involucra formar la arcilla caolinita a la forma deseada y dejarla secar. El material entonces es cocido en un horno a temperaturas por arriba de 800° C para convertir la arcilla en un material parecido al vidrio llamado ***bisque*** a través de la vitrificación. La figura 6-20 muestra un ejemplo de bisque. Durante el calentamiento, el agua vinculada a los óxidos se pierde. La caolinita frecuentemente pierde más de 10% de su peso debido a la pérdida de agua. Los poros en la arcilla proporcionan canales naturales para ventilar el vapor del agua. El cambio estructural a la arcilla en este proceso de "fumado de agua" es irrevocable. El resto del proceso térmico involucra el quemado de cualquier orgánico, inversión análoga del cuarzo que se encuentra en la fabricación del vidrio y la sinterización similar a la de la producción de cemento.

| ***Bisque*** |
Material parecido al vidrio que resulta de la cocción de arcilla caolinita.

Al retirarlo del horno, los cerámicos blancos generalmente se cubren de ***vidriado*** y recocidos en un horno a temperaturas entre los 950° C y los 1430° C para convertir la arcilla a una sustancia dura parecida al vidrio y hacer el vidriado. Los vidriados per se son materiales vítreos de SiO_2 junto con una mezcla de otros óxidos metálicos. El color del vidriado varía según las condiciones de cocción y la presencia de otros óxidos de metal. Durante muchos años los cerámicos vidriados frecuentemente contenían óxido de plomo, el cual resultaba en la contaminación de los arroyos de aguas residuales. Mucha de la investigación de campo se enfoca en la eliminación del uso de plomo en los vidriados y a la mejora de los métodos de reciclaje del desperdicio de vidriado.

| ***Vidriado*** |
Mezcla de SiO2 y óxidos de metal que se usan para cubrir material bisque y proporcionan color cuando son recocidos.



Los vidriados con frecuencia tienen una función puramente decorativa, proporcionando color al producto plenamente blanco de caolinita cocido. Los vidriados se aplican como suspensiones basadas en agua. Para la mayoría de los productos comerciales, la aplicación del vidriado está automatizada, pero muchos artesanos aún desarrollan y aplican su propio vidriado a mano.



FIGURA 6-20 Calabaza de bisque previa al vidriado

Cortesía de James Newell

6.8 CERÁMICOS AVANZADOS

| *Cerámicos avanzados* | Materiales cerámicos de ingeniería usados principalmente para aplicaciones de alta gama.

| *Biocerámicos* | Cerámicos utilizados en aplicaciones biomédicas.

Los ***cerámicos avanzados*** son materiales de ingeniería utilizados principalmente para aplicaciones de alta gama. Estos materiales evolucionan constantemente y esta sección se esfuerza en proporcionar una mezcla de las aplicaciones actuales y una mirada al futuro.

La armadura de cerámico, las nanopartículas de cerámico, las celdas de combustible de óxido sólido y los ***biocerámicos*** comprenden los principales ejemplos de cerámicos avanzados. La armadura de cerámico está hecha principalmente de carburos o nitrato de boro, mayormente debido a la dureza excepcional de estos materiales. La tabla 6-9 resume sus propiedades físicas clave.

El nitruro de boro (BN) se presenta de dos distintas formas. El nitruro de boro hexagonal es similar al grafito y frecuentemente se utiliza como lubricante, pero no es apropiado para armaduras. El nitruro de boro cúbico forma una estructura similar al diamante y es segundo en dureza sólo comparado con el diamante. Aunque un proceso de fabricación de nitruro de boro fue primeramente descubierto en 1957, no había ninguna producción comercial relevante hasta finales de los años ochenta. Debido a la dificultad para fabricar el nitruro de boro cúbico, es más utilizado para polvos o capas aislantes que para armaduras.

El carburo de boro (B_4C) es el tercer material más duro después del diamante y el nitruro de boro cúbico. La combinación de baja densidad, alta dureza y alto módulo de Young hace del carburo de boro ideal para su uso como armadura corporal. El carburo de boro es fabricado añadiendo carbono al B_2O_3 en un horno de arco, pero es difícil de sinterizar. Frecuentemente deben añadirse otros materiales como ayudas a la sinterización.

El carburo de titanio (TiC) ha encontrado la mayoría de sus aplicaciones como puntas en herramientas cortantes y brocas (frecuentemente mezcladas con carburo de tungsteno), pero nuevos avances han incrementado su uso como armadura. Debido a su densidad relativamente alta, el TiC es poco apropiado para armaduras corporales pero está encontrando su uso en vehículos de guerra armados.

| *Proceso de proyección térmica por flama* | Método para producir nanopartículas de cerámico en el que un orgánico metálico líquido se coloca en una flama para formar un núcleo para el crecimiento de partículas.

Recientemente se han encontrado más usos comerciales para las nanopartículas de cerámico. Éstas se pueden producir a través de una variedad de técnicas, incluyendo los geles de sol y el ***proceso de proyección térmica por flama***. En el proceso de proyección térmica por flama un orgánico metálico líquido es vaporizado y colocado en una flama, en donde rápidamente se oxida y forma un núcleo para una nanopartícula de óxido de metal. Estos núcleos chocan y se combinan para formar la partícula final. Las nanopartículas basadas en sílice sensibles a la luz las utilizan para localizar tumores en pacientes con cáncer. Las nanopartículas de $BaTiO_3$ en el rango de tamaño de 20 nm a 100 nm las usan en condensadores de cerámico multicapas, mientras que las nanopartículas de carburo de silicio (SiC) están bajo pruebas para su uso en las armaduras mejoradas.

En general, las nanopartículas de cerámico muestran gran potencial en la mejora de la tenacidad y ductilidad para los cerámicos, mejorando la resistencia al uso y a los rayones de las partes de cerámicos, y permitiendo las mezclas de materiales que usualmente no son miscibles.

Tabla 6-8 Propiedades físicas de cerámicos avanzados usados en armaduras

Material	*Tm(°C)*	*Módulo de Young (GPa)*	*Densidad* (g/cm^3)	*Densidad* (g/cm^3)
Nitruro de boro	3000	20-100	2.2	9.5-10
Carburo de boro	2445	450-470	2.52	9.5
Carburo de titanio	3160	440-455	4.93	9-9.5

Con la demanda creciente para reducir la dependencia en los combustibles fósiles, el interés industrial en las celdas de óxido de combustible sólido (SOFC) ha crecido dramáticamente. Una SOFC utiliza electroquímica para convertir la energía química directamente a energía eléctrica en un proceso similar a las celdas galvánicas comentadas en el capítulo 5. En la celda, un material anódico y un material catódico son separados mediante un aislante que también conduce átomos de oxígeno desde el cátodo al ánodo, en donde reaccionan con la fuente de combustible. Muchas celdas de combustible requieren un vapor de hidrógeno limpio como el combustible, pero las SOFC también pueden utilizar hidrocarburos.



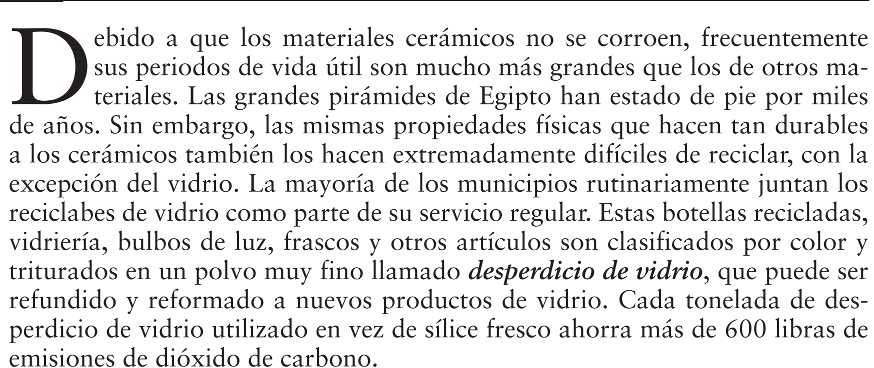
Los materiales cerámicos, incluyendo cromita de lantano chapado con estroncio, son usados como material de interconexión entre las celdas individuales. A diferencia de muchas celdas de combustible, las SOFC operan a un rango de muy alta eficiencia; debido a que también requieren altas temperaturas, el uso de cerámicos avanzados es esencial. Los óxidos de níquel también son comúnmente usados como el material ánodo.

Los biocerámicos se comentan más a fondo en el capítulo 9 (biomateriales), pero las funciones principales de los biocerámicos incluyen las superficies lubricantes de las prótesis, proporcionando cubiertas resistentes a los coágulos en las válvulas cardiacas, sirviendo como agentes de transferencia y colectores de especies radioactivas para tratamientos cancerígenos y proporcionando marcos para estimular el crecimiento óseo.

¿Qué pasa con los materiales cerámicos al final de sus vidas útiles?

6.9 RECICLAJE DE MATERIALES CERÁMICOS





Debido a que los materiales cerámicos no se corroen, frecuentemente sus periodos de vida útil son mucho más grandes que los de otros materiales. Las grandes pirámides de Egipto han estado de pie por miles de años. Sin embargo, las mismas propiedades físicas que hacen tan durables a los cerámicos también los hacen extremadamente difíciles de reciclar, con la excepción del vidrio. La mayoría de los municipios rutinariamente juntan los reciclabes de vidrio como parte de su servicio regular. Estas botellas recicladas, vidriería, bulbos de luz, frascos y otros artículos son clasificados por color y triturados en un polvo muy fino llamado ***desperdicio de vidrio***, que puede ser refundido y reformado a nuevos productos de vidrio. Cada tonelada de desperdicio de vidrio utilizado en vez de sílice fresco ahorra más de 600 libras de emisiones de dióxido de carbono.

| ***Desperdicio de vidrio*** | Polvo de vidrio muy fino utilizado en el reciclaje de cerámico.

La mayoría de los materiales cerámicos se han enterrado en basureros. Sin embargo, iniciativas recientes están retando dichas prácticas. Los abrasivos, una vez que se pensó que era imposible reciclarlos, ahora se recolectan, reciclan e intercambian vía Internet entre diferentes usuarios finales. Algunas compañías pulverizan concretos basados en Portland de los proyectos de demolición de construcciones y los usan como agregado para proyectos futuros. También los cerámicos blancos por lo común son enterrados después de que se completó su uso, pero un par de compañías en Nueva Zelanda, Electrolux y Fisher & Paykel Appliances, han iniciado programas de administración de vida para reducir el desperdicio en la fabricación de cerámicos blancos y para proporcionar reciclaje de fin de vida.

¿El grafito es un polímero o un cerámico?

6.10 GRAFITO

| *Grafito* |
Material de carbono alotrópico que consiste de anillos aromáticos de seis miembros de carbono enlazados en planos lisos, permitiendo la fácil ocurrencia del deslizamiento entre los planos.

El ***grafito*** hace una transición ideal de los comentarios sobre los cerámicos a los comentarios sobre los materiales de carbono. El grafito es una forma alotrópica del carbono con una estructura en capas en la que existen anillos de seis miembros aromáticos en los planos de grafeno, con cada capa separada 3.5 angstroms, como se muestra en la figura 6-21. Los enlaces covalentes estabilizados por resonancia entre los átomos de carbono en los planos son increíblemente fuertes, pero sólo las interacciones débiles de van der Waals existen entre los planos. Esta diferencia entre las fuerzas de enlace dentro del plano y entre los planos hace del grafito un material altamente anisotrópico en el que las propiedades del material son una fuerte función de dirección. Se requieren grandes tensiones para romper los enlaces dentro del plano, pero relativamente poca tensión provocará que los planos de capas se deslicen entre ellos. A pesar de que tiene la misma composición química que el diamante, el grafito es extremadamente suave con una dureza Moh entre 1 y 2. Como resultado, el grafito es un excelente lubricante y funciona como "plomo" de lápiz. El grafito es térmico y eléctricamente conductivo entre los planos de capas pero aísla en la dirección perpendicular al plano. El grafito encuentra uso relevante en los reactores nucleares como revestimiento para el reactor y como moderador que hace lo suficientemente más lentos a los neutrones como para inducir la fisión en U-235.

En muchas formas el grafito es un material difícil de clasificar. Es claramente una forma alotrópica del carbono, pero también embona en la definición técnica de un polímero. Es una gran cadena de unidades repetidas (los anillos de seis miembros) enlazadas covalentemente. El grafito es frágil, fuerte, aislante (al menos en una dirección) y tiene el más alto módulo de Young de cualquier material (1080 GPa).

Aunque las propiedades del grafito son únicas, otros materiales de carbono ofrecen distintas uniones de propiedades que los hacen ideales para aplicaciones específicas. Las siguientes tres secciones examinan el diamante, las fibras de carbono, los nanotubos de carbono y los fullerenos.

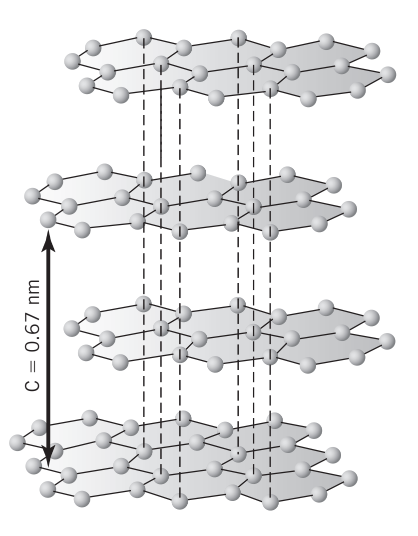


Figura 6-21 Estructura del grafito

¿Otros materiales de carbono ofrecen propiedades inusuales?

6.11 DIAMANTE

El ***diamante*** es una forma alotrópica del carbono que forma una estructura FCC transparente con átomos de carbono que también ocupan cuatro de los ocho sitios intersticiales tetraédricos como se muestra en la figura 6-22. La mayoría de las propiedades excepcionales del diamante resultan de su estructura de cristal. El diamante es el material más duro por naturaleza (dureza Moh = 10) y sólo puede rayarse con otros diamantes. El nombre diamante viene de la palabra griega para invencible (*adamas*).

| *Diamante* |
Forma alotrópica altamente cristalina del carbono que es el material más duro conocido.

La mayoría de los diamantes son incoloros, pero pueden desarrollar un color debido a la presencia de impurezas. El tinte amarillo asociado con los diamantes de baja calidad viene de la presencia de nitrógeno, la impureza más común. La impureza de nitrógeno ocupa un sitio de red cristalina normalmente llenado por un átomo de carbono. Otras impurezas pueden resultar en una variedad de colores, incluyendo blanco, metálico, azul, rojo, verde y rosa.

El uso comercial de los diamantes entra en dos extensas categorías: gemas y procesos industriales. Más de 25 000 kilogramos de diamantes se extraen de las minas cada año, pero la mayoría carecen del color, tamaño y claridad necesarios para su uso como gemas. Al contrario, casi 80% se clasifican como ***diamantes negros*** y se utilizan para procesos industriales, incluyendo navajas de sierras, puntas de brocas, bisagras de baja fricción en las naves espaciales y como agentes pulidores.

| *Diamantes negros* |
Diamantes que carecen de la calidad de gema y se utilizan para propósitos industriales.

Los diamantes naturales se forman cuando los depósitos de carbono están expuestos a una mezcla de temperatura y presión extremas durante periodos suficientemente grandes como para permitir el crecimiento del cristal. La mayoría de los diamantes se dan en tubos volcánicos que se forman de erupciones de magma en la profundidad de la Tierra. Estos tubos proporcionan la temperatura y la presión necesarias para formar diamantes. Dichos tubos volcánicos son raros; la mayoría de los diamantes se extraen de minas de África central y del sur.

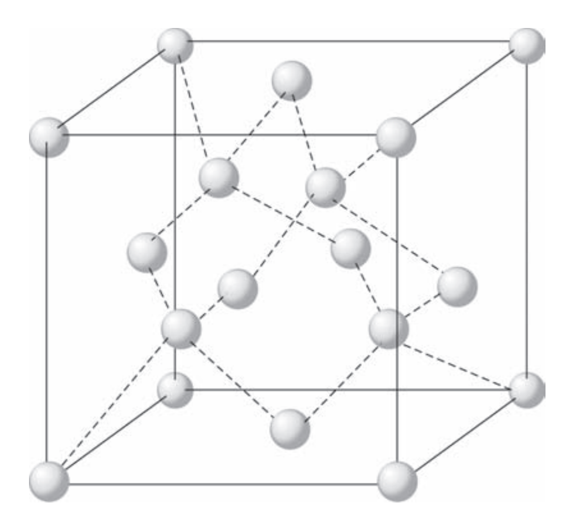


Figura 6-22 Estructura cristalina del diamante

El alto costo de los diamantes naturales limitan su uso industrial, pero los diamantes sintéticos ofrecen muchas posibilidades. El famoso autor de ciencia ficción H. G. Wells especulaba acerca de la manufactura de diamantes sintéticos en su libro de 1914 *The Diamond Maker*, pero los primeros diamantes sintéticos no se produjeron sino hasta 1953. El más grande obstáculo para la fabricación del diamante sintético ha sido la necesidad de lograr y mantener presiones tan altas como 55 000 atmósferas. El método industrial más común, el ***método HPHT*** (presión alta, temperatura alta) utiliza prensas gigantes para producir y mantener presiones tan altas como 5 GPa a una temperatura de 1500º C. Este método es lento, el equipo es costoso y pesa varias toneladas, pero los materiales mejorados para contención ahora permiten producciones más rápidas de diamantes sintéticos más grandes y de más alta calidad.

| *Método HPHT* | Proceso para la producción de diamantes sintéticos utilizando temperaturas elevadas y altas presiones.

La deposición química de vapor (CVD) de los diamantes sintéticos apareció por primera vez en los años ochenta y ofrece una alternativa prometedora. Un plasma que contiene carbono se forma en una molécula de sustrato mediante radiación de microondas o descarga de arco, y el diamante es esencialmente "armado" de átomo en átomo a partir del gas. Aunque prometedores, los procesos CVD aun enfrentan numerosas barreras técnicas antes de que la fabricación en gran escala sea práctica.

Los diamantes tienen gran potencial como disipadores de calor en microprocesadores o aun como semiconductores. Los semiconductores de diamante operan a temperaturas por arriba de la que fundiría el silicio. Muchos investigadores esperan la siguiente generación de supercomputadoras para incluirles microchips de diamantes.

6.12 FIBRAS DE CARBONO

| *Fibras de carbono* | Formas de carbono hechas al convertir una fibra precursora en una fibra totalmente aromática con propiedades mecánicas excepcionales.

| *Carbonización* | Pirólisis controlada de un precursor de fibra en una atmósfera inerte.

| *Estabilización* | Conversión de un precursor de fibra de carbono a una forma térmicamente estable que no se fundirá durante la carbonización.

| *Planos de capas de grafeno* | Planos paralelos consistentes de anillos de seis miembros de carbono aromático conjugados.

| *Turboestrática* | Estructura en la que las irregularidades en planos paralelos de otra manera causan distorsión.

Las ***fibras de carbono*** son definidas por la International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) como "fibras (filamentos, cuerdas, hilos, mechas) consistentes de al menos 92% (fracción de masa) de carbono, usualmente en un estado no grafítico". Las más recientes propiedades de la fibra de carbono dependen directamente de la selección y el procesamiento de los materiales precursores, la formación de la fibra y el subsecuente procesamiento de la fibra. Dependiendo de cómo sean procesadas, las fibras de carbono pueden obtener un amplio rango de propiedades físicas, químicas, eléctricas y térmicas. Esta flexibilidad hace de las fibras de carbono el principal reforzamiento de los materiales en compuestos avanzados con diversas aplicaciones, incluyendo las aeronaves militares y los misiles, los paneles de la carrocería de los automóviles, equipo deportivo, baterías y condensadores y carbones activados.

La mayoría de las fibras de carbono comerciales se producen a través de la ***carbonización***, aunque algunas fibras de especialidades se producen a través del crecimiento de hidrocarburos gaseosos. Se requieren temperaturas extremadamente altas para quitar todo menos los anillos aromáticos de carbono, pero la mayoría de las fibras se fundirían antes de la carbonización. Por lo tanto, las fibras precursoras deben ser convertidas a una forma térmicamente estable que no se puede fundir a través de un proceso llamado ***estabilización***. Durante el proceso de carbonización, los carbonos inorgánicos y alopáticos se limpian, dejando una fibra consistente de ***planos de capas de grafenos***. Una fibra de carbono idealizada se muestra en la figura 6-23.

Las verdaderas fibras de carbono nunca logran la estructura idealizada mostrada en la figura 6-23. En vez de esto, forman capas ***turboestráticas*** en las que la distancia entre los planos de placas varía, pero la distancia promedio

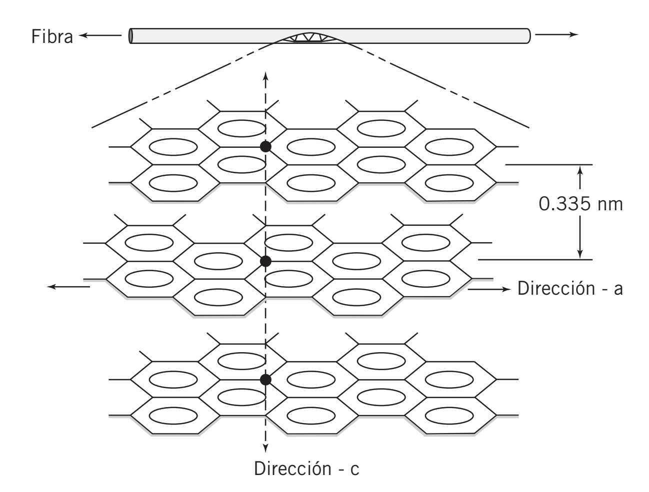


Figura 6-23 Fibra de carbono idealizada

siempre es más grande que la óptima de 3.35 angstroms. Las cavidades y las malas alineaciones son comunes y reducen significativamente la fuerza de la fibra.

La mayoría de las fibras de carbono comerciales se producen a partir de fibras de poliacrilonitrilo (PAN). Las fibras de carbono basadas en PAN son muchas veces más fuertes que el acero en relación al peso. Al tener las fibras de carbono más fuerza disponible comercialmente, dominan el mercado por sus aplicaciones estructurales.

El poliacrilonitrilo comercial es de hecho un copolímero de acrilonitrilo y otro monómero (acetato de vinilo, metilo acrilato o ácido acrílico) que se añade para bajar la temperatura de transición vítrea del material y controlar su resistencia a la oxidación. Antes de que las fibras acrílicas producidas en el proceso de hilado húmedo puedan ser sujetas a las elevadas temperaturas de carbonización, son estabilizadas en el aire a temperaturas entre los 200º C y los 300º C y bajo tensión para prevenir el encogimiento de la fibra.

Durante el proceso de estabilización, la fibra se convierte a un polímero escalonado a través de una combinación de reacciones de oxidación, deshidrogenación y ciclización mostradas en la figura 6-24. La fibra estabilizada es carbonizada en una atmósfera inherente a temperaturas que varían de los 1000º C a los 3000º C, dependiendo de las propiedades deseadas. Durante la pirólisis, casi todos los carbonos inorgánicos y no aromáticos se sacan.

PAN

Deshidrogenación
$+O_2$
$-H_2O$

Ciclización

Figura 6-24 Mecanismo general para la estabilización del PAN

| *Brea de mesofase* |
Subproducto de la destilación del alquitrán o el petróleo formado en regiones con orden cristalino líquido a través de tratamiento térmico.

Las fibras de carbono basadas en la ***brea de mesofase*** representan un nicho del mercado más pequeño pero significativo. Estas fibras desarrollan módulos excepcionales y excelentes en propiedades basadas en redes cristalinas, incluyendo rigidez y conductividad térmica. La brea es el residuo del petróleo o alquitrán de hulla consistente de cientos de miles de especies químicas diferentes con un peso molecular promedio de varios cientos. Muchas de las moléculas en estas breas contienen grandes cantidades de anillos aromáticos que harían fibras de carbono ideales. Algunas breas pueden hilarse directamente hacia las fibras de breas isotrópicas que pueden estabilizarse y carbonizarse. Aunque son baratas y fáciles de hacer, estas fibras de carbono isotrópicas son débiles y tienen conductividades térmicas más bajas.

Para obtener mejores fibras de carbono, la brea debe sujetarse a una serie de tratamientos térmicos y extracciones de solventes. Durante estos tratamientos se forma una fase cristalina líquida (o mesofase). Una molécula de brea de mesofase típica se muestra en la figura 6-25.

Las fibras de breas de mesofase se producen a través de hilatura de fusión que es esencialmente el mismo proceso utilizado para hilar polímeros comerciales. Un extrusor funde las partículas de brea y bombea la brea fundida a través de un dispositivo hilador de múltiples orificios. Las fibras que emergen del dispositivo hilador son elaboradas por un carrete de ventilación. La tabla 6-10 resume las propiedades de las fibras de carbono basadas en breas y basadas en PAN.

Peso molecular = 1178

C/H = 1.50

$H_{aromático}/H_{alifático} = 1.30$

$C_{aromático}/C_{alifático} = 6.15$

Figura 6-25 Molécula representativa de la brea de mesofase

Tabla 6-10 Propiedades mecánicas de las fibras de carbono comerciales

Tipo de fibra	*Material precursor*	*Resistencia a la tracción (GPa)*	*Módulo de Young (GPa)*
T-300	PAN	3.66	231
T-650/35	PAN	4.28	241
P-100S	Brea	2.41	759
P-120S	Brea	2.41	828
K-1100	Brea	3.10	931

6.13 FULLERENOS (BUCKYBALLS) Y NANOTUBOS DE CARBONO

Hasta 1985, el grafito y el carbono eran los alótropos estables del carbono conocidos. En 1990 los científicos fueron capaces de producir una nueva forma de carbono que se asemejaba mucho a una pelota de fútbol soccer. Este nuevo alótropo, que se muestra en la figura 6-26, contiene 60 átomos de carbono (C_{60}) formados en 20 hexágonos y 12 pentágonos. Las moléculas son nombradas oficialmente ***fullerenos de Buckminster*** en honor al famoso arquitecto Buckminster Fuller, quien diseñó algo semejante a un domo geodésico, pero son más comúnmente llamados *fullerenos o buckyballs*. Los fullerenos más grandes con 70, 76 y 78 átomos de carbono se han sintetizado en los remanentes de las corrientes de plasma y se han teorizado estructuras aun más estables.

| *Fullerenos de Buckminster* | Alótropos de carbono con por lo menos 60 átomos de carbono formados como una pelota de fútbol soccer o domo geodésico.

La forma de tipo jaula vacía de las buckyballs ha intrigado a los investigadores quienes entrenan moléculas específicas dentro de la estructura abierta. Algunos investigadores examinan la posibilidad de utilizar buckyballs para lograr antibióticos específicos para las bacterias que resistan antibióticos orales tradicionales o intravenosos. La estructura también parece prometedora para

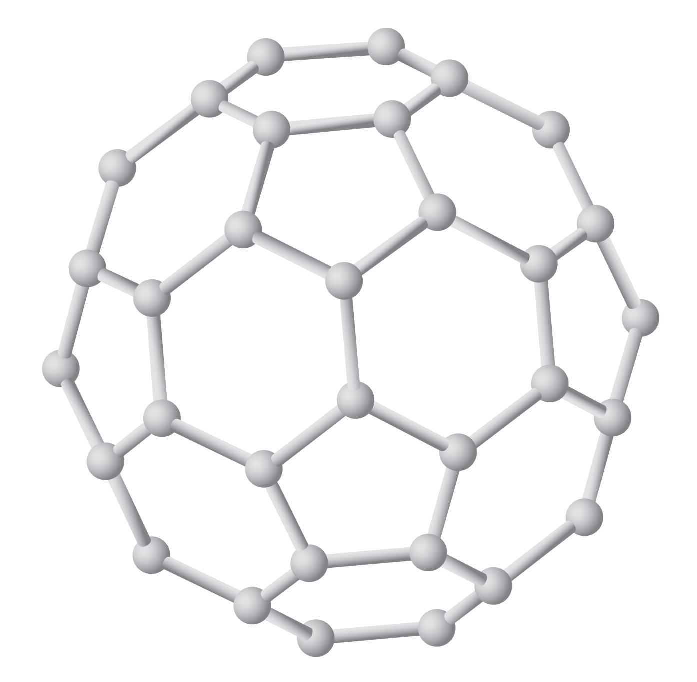


Figura 6-26 Estructura de una buckyball

la superconducción y el acero inoculando con las buckyballs que han atrapado átomos de metal. Algunos estudios han indicado que las buckyballs pueden ser tóxicas para organismos vivientes, pero muchos de estos estudios son muy preliminares para calibrar los efectos de las moléculas potenciales en la salud.

| ***Nanotubos de carbono*** | Tubos sintéticos de carbono formados al doblar un plano de grafeno sobre otro.

Los ***nanotubos de carbono*** representan a los otros nuevos materiales de carbono prometedores. Los nanotubos de carbono de una pared (SWNT) son esencialmente un plano de grafeno sencillo enrollado en un tubo cilíndrico, como se muestra en la figura 6-27. Los nanotubos de carbono son una orden de magnitud más fuerte que el acero en una base por peso y seis veces más fuerte que las mejores fibras de carbono, y presentan propiedades eléctricas excepcionales. Muchos expertos creen que los SWNT revolucionarán la industria microelectrónica casi de la misma manera en que lo ha hecho la tarjeta de silicio. Los SWNT también pueden alinearse para formar estructuras simples como cuerdas y películas.

| ***Modelo de muñeca rusa*** | Representación de nanotubos de carbono multiparedes en los que las placas externas de grafeno rodean a las internas, muy parecido a las matriuskas.

Los nanotubos de carbono multiparedes (MWNT) involucran múltiples planos de placas de grafeno enrollados en el mismo tipo de tubos cilíndricos que los SWNT. Un ***modelo de muñeca rusa*** se utiliza para describir estos tubos en los que una placa de grafeno exterior rodea un plano de placa de grafeno interior que rodea a otro, muy parecido a las matriuskas que entran una adentro de la otra. Las capas interiores del MWNT pueden deslizarse a través de la otra con casi ninguna fricción, lo cual crea el primer cojinete rotacional perfecto.

Los MWNT se clasifican por un par de enteros (n.m) que representan un par de vectores de unidad que definen la dirección junto con el plano de grafeno, como se muestra en la figura 6-28, muy parecido a los índices utilizados

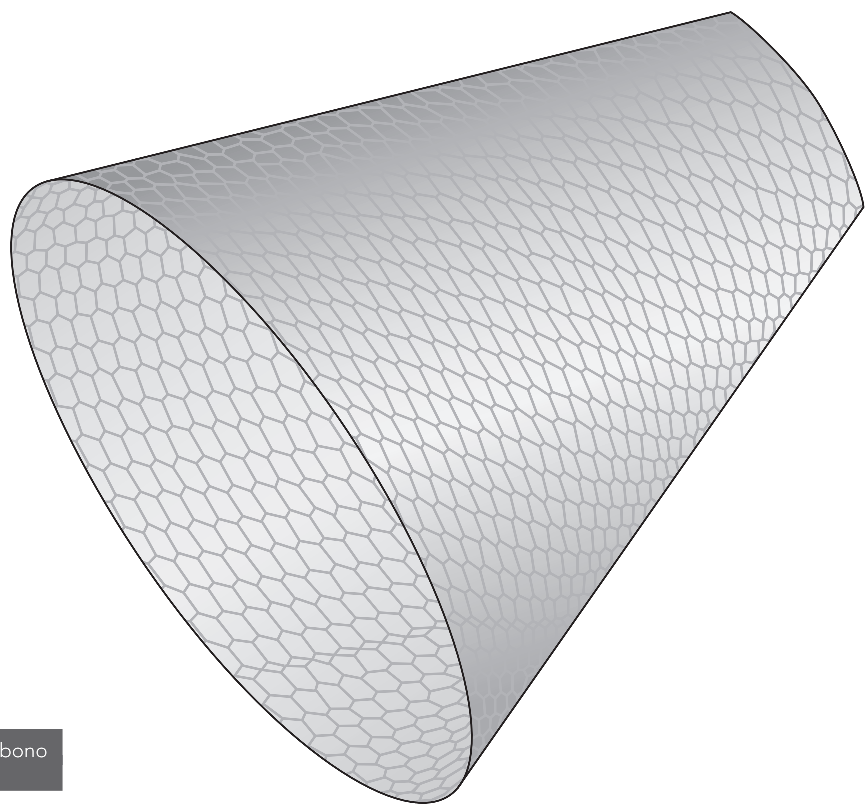


Figura 6-26 Nanotubo de carbono de una pared

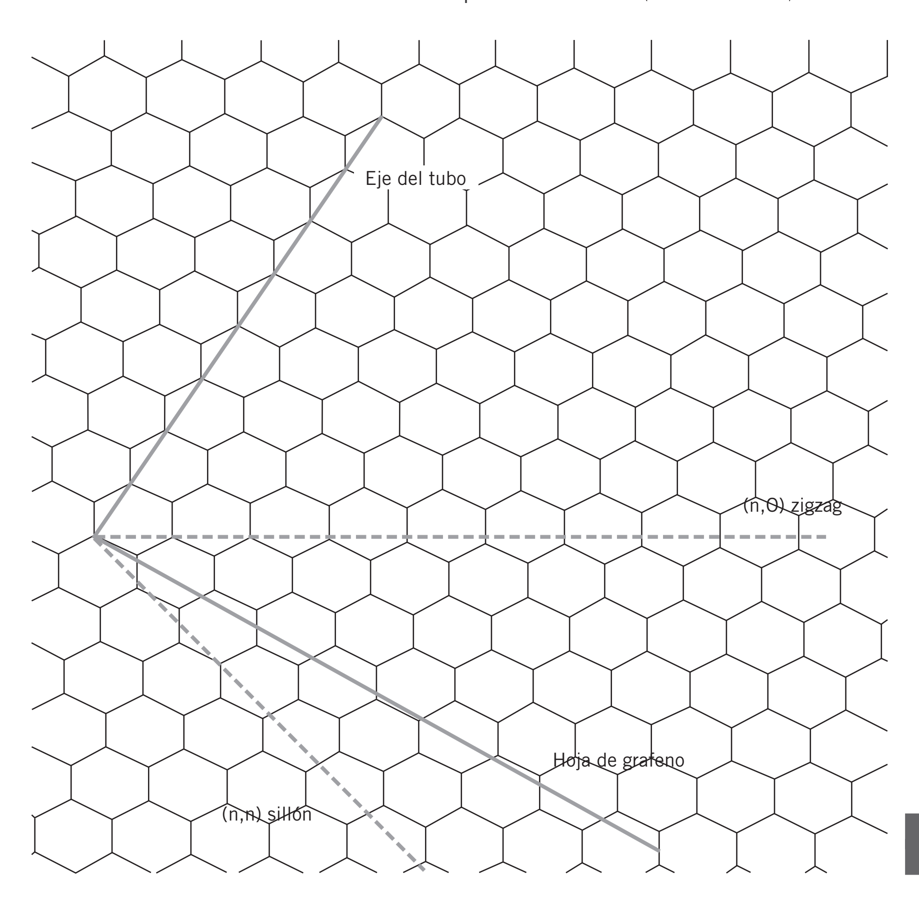


Figura 6-26 Vectores en un plano de grafeno

para representar las direcciones en una red de Bravais. Los nanotubos con m ≠ 0 se clasifican como *zigzag*. Aquellos con m = n se clasifican como *sillón*, mientras que aquellos con m ≠ n se llaman *quiral*.

La estructura del tubo afecta grandemente las propiedades eléctricas de los MWNT. Los MWNT con índices que satisfacen la ecuación 6.10,

$$2m + n = 3q \tag{6.10}$$

En donde q es un entero, se conducen tan eficientemente como los metales pero son capaces de manejar densidades de corriente, diversos órdenes de magnitud más grandes que los metales más conductivos. Aquellos que no satisfacen la ecuación despliegan propiedades de semiconductor.



El alto costo de la producción de nanotubos de carbono limita su extenso uso comercial. Pequeñas cantidades de algunos nanotubos de carbono suceden naturalmente en el hollín y la ceniza, pero estos nanotubos son muy irregulares para el uso comercial. Muchas técnicas pueden usarse para producir nanotubos de carbono, incluyendo la ablación láser y la descarga de arco, pero la más prometedora se parece a un proceso de deposición de química del vapor (CVD). En este proceso, el acetileno u otro gas carbonáceo es pasado a través de un catalizador de metal a altas temperaturas en condiciones firmemente controladas. La investigación significativa se enfoca en la reducción de los costos de procesamientos y en la mejora de la calidad del producto.

Resumen del capítulo 6



En este capítulo se examinaron:

- Las estructuras de cristal únicas para los cerámicos y cómo calcular los números de coordinación.
- Las propiedades relevantes de los abrasivos con un examen más detallado de la lija.
- La química del cemento Portland.
- El proceso de la formación del vidrio, incluyendo el rol de los aditivos.
- Las propiedades relevantes de los refractarios.
- Los usos de los productos estructurales de la arcilla.
- La formación de cerámicos blancos y el uso del vidriado.
- La estructura única y las propiedades del grafito.
- Las propiedades del diamante y los procesos para fabricar diamantes sintéticos.
- Y se compararon las fibras de carbono basadas en PAN y basadas en brea.
- Las estructuras de los fullerenos y los nanotubos de carbono y la consideración de su potencial para futuras aplicaciones.

Términos clave

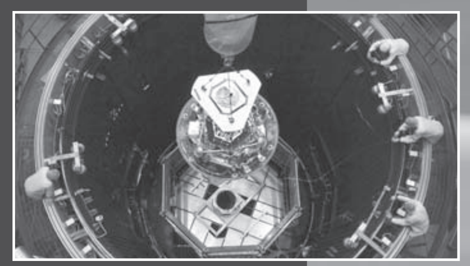
abrasivos *p. 198*
arcilla *p. 209*
arcilla refractaria *p. 209*
biocerámicos *p. 212*
bisque *p. 211*
brea de mesofase *p. 218*
calcinación *p. 205*
caolinita *p. 209*
carbonización *p. 209*
cemento *p. 204*
cemento Portland *p. 204*
cementos hidráulicos *p. 204*
cementos no hidráulicos *p. 204*
cerámicos *p. 190*
cerámicos avanzados *p. 212*
cerámicos blancos *p. 210*
clinkerización *p. 205*
concreto *p. 204*
cristobalita *p. 201*
desperdicio de vidrio *p. 213*
diamante *p. 215*
diamante negro *p. 215*
estabilización *p. 216*
estructura de cloruro de sodio *p. 194*
estructura de corindón *p. 199*
estructura de fluoruro de calcio *p. 195*
estructura de la blenda de zinc *p. 195*
estructura espinela *p. 196*
estructura perovskita *p. 196*
evaporación-deshidratación *p. 205*
fibras de carbono *p. 216*
friable *p. 199*
fullerenos Buckminster *p. 219*
grafito *p. 214*
Lehr *p. 203*
método HPHT *p. 216*
modelo de muñeca rusa *p. 220*
modificadores de red *p. 201*
mullita *p. 209*
nanotubos de carbono *p. 220*
número de coordinación *p. 191*
óxidos intermediarios *p. 201*
pasta de cemento *p. 206*
periclasa *p. 209*
piedra china *p. 211*
planos de placas de grafeno *p. 216*
porcelana *p. 210*
poros capilares *p. 208*
poros de gel *p. 208*
posiciones octaédricas *p. 194*
posiciones tetraédricas *p. 193*
prensa de polvo *p. 200*
proceso de aerosoles de flama *p. 212*
proceso de vidrio flotado *p. 203*
productos estructurales de la arcilla *p. 210*
red flexible *p. 201*
refractarios *p. 209*
sol-gel *p. 199*
terracota *p. 210*
tridimita *p. 201*
turboestrática *p 216*
vidriado *p. 211*
vidrio de sílice *p. 201*
vidrio de sosa-cal *p. 201*
vidrios *p. 201*
vitrificación *p. 201*

Problemas de tarea

1. Calcule el número de coordinación para el ZrO_2.
2. Explique por qué se añade yeso al cemento Portland.
3. ¿Cómo afectan los modificadores de red a las propiedades de los vidrios?
4. Compare y contraste la temperatura de transición vítrea de los vidrios con la de los polímeros.
5. Describa el principio operativo de una celda de combustible de óxido sólido.
6. Encuentre al menos tres productos comerciales hechos con fibras de carbono. Determine si se utilizan fibras basadas en brea o basadas en PAN.
7. ¿Qué es la brea de mesofase?
8. Calcule el número de coordinación del CaO.
9. ¿Por qué a veces el grafito es considerado un polímero y a veces es tratado como cerámico?
10. Explique por qué el diamante es extremadamente duro y el grafito no, aun cuando ambos materiales están hechos de carbono puro.
11. Considere una mezcla de 40 wt% MgO y 60 st% Al_2O_3. ¿Qué fases y composiciones están presentes a los 1600º C?¿A qué temperatura aparece el primer líquido?
12. Explique por qué los cerámicos son fuertes pero frágiles.
13. Muestre que la proporción mínima catión-anión es 0.155 para un sistema con un número de coordinación de 3.
14. Explique el rol de C-S-H en la hidratación del cemento.
15. Explique por qué la terracota se utiliza con frecuencia para tuberías de desagüe.
16. Explique la diferencia entre los poros de gel y los poros capilares.
17. Describa las diferencias entre nanotubos sillón, quiral y zigzag.
18. ¿Por qué es muy fácil separar capas de grafito?
19. Explique los impactos ambientales y económicos del amplio uso de los SOFC.
20. ¿Cuál es el propósito del vidriado en los cerámicos blancos?
21. Explique por qué el SiO_2 fundido forma vidrio en vez de volverse a enfriar a una forma cristalina.
22. Explique por qué el nitrato de boro hexagonal no es apropiado para su uso en las armaduras corporales.
23. Defina el sol-gel.
24. Dibuje una estructura espinela y marque las posiciones tetraédricas y octaédricas.
25. Explique por qué el polvo de diamante es tan ideal para pulir.
26. Compare y contraste la vitrificación y la sinterización.
27. Compare y contrastar las propiedades del vidrio de sílice y el cemento Portland.
28. ¿Por qué es potencialmente beneficioso incluir cenizas volantes en el cemento Portland?
29. Encuentre dos usos potenciales adicionles para las nanopartículas de cerámico no comentados en el capítulo.
30. Determine las fracciones de masa en la fase líquida para un sistema con 20% de Al_2O_3 y 80% de MgO a 2400º C.
31. ¿Qué propiedades son más importantes al seleccionar un refractario?
32. Explique cómo el prensado de polvo isotáctico difiere del prensado de polvo estándar.
33. Explique cómo la necesidad de balancear la carga afecta las propiedades mecánicas de los cerámicos.
34. Cite ventajas y desventajas por el uso de fibras de carbono en vez de polímeros de alto desempeño para las siguientes aplicaciones:
    a) Equipo aeroespacial.
    b) Armazones de autos de carreras.
    c) Palos de golf.
35. ¿Por qué los cerámicos son esencialmente inmunes a la corrosión? 
36. Describa las cinco etapas del endurecimiento del cemento.

7 Compuestos

Photodisk/ SUPERSTOCK









CONTENIDO

Objetivos de aprendizaje

Al final de este capítulo el estudiante debe ser capaz de:

- Identificar las características relevantes entre los compuestos reforzados con fibras, de partículas y laminares.
- Distinguir entre un compuesto y una aleación.
- Comparar y contrastar los papeles de la fibra y la matriz en los compuestos reforzados con fibras.
- Explicar la relevancia de la calidad del enlace entre la fibra y la matriz.
- Calcular densidad, conductividad eléctrica, conductividad térmica, resistencia a la tracción y módulos elásticos de un compuesto si se conocen las fracciones de volumen de los materiales componentes (incluyendo los poros).
- Calcular la fracción de la carga aplicada manejada por las fibras.
- Distinguir entre fibras uniaxiales, fibras picadas y esteras tejidas y explicar cómo la orientación de la fibra impactará las propiedades del compuesto.
- Comentar los factores económicos y mecánicos que influyen en la decisión sobre cuánta fibra incluir en un compuesto.
- Describir los fundamentos de las técnicas de producción de compuestos, incluyendo poltrusión, devanado de filamentos húmedos, preimpregnación y moldeo de transformación de resinas
- Examinar los principales tipos de fibras reforzantes y considerar los factores que influyen su selección.
- Contrastar las diferentes funciones de una variedad de materiales de matriz.

- Explicar el rol de los agregados en los compuestos de partículas.
- Comentar las implicaciones de la matriz del cemento Portland en las propiedades del concreto.
- Explicar el rol de las añadiduras en el concreto.
- Describir la influencia de la proporción agua-cemento, tamaño agregado y forma agregada en las propiedades mecánicas del concreto.
- Explicar por qué el concreto es mucho más débil en tensión que en compresión.
- Medir e interpretar la tensión de compresión de máximo 28 días de una columna de concreto.
- Definir y medir los módulos de ruptura.
- Definir y medir los módulos secantes efectivos de la elasticidad.
- Definir barras de refuerzo y explicar su uso en el concreto reforzado.
- Explicar el rol del asfalto en la pavimentación.
- Distinguir entre los procesos de asfalto de mezcla caliente (HMAC), mezcla tibia (WAM) y mezcla fría y su influencia en las propiedades.
- Describir los componentes y usos de la madera contrachapada.
- Explicar los factores que influyen en la selección de epóxicos para compuestos laminares.
- Examinar el destino de la mayoría de los compuestos obsoletos y considerar el estado de reciclaje.

¿Qué son los materiales compuestos y cómo se hacen?

| ***Compuestos*** |
Material formado al mezclar dos materiales en distintas fases causando un nuevo material con diferentes propiedades de los padres.

| ***Compuestos reforzados con fibras*** |
Compuestos en los que un material forma la matriz externa y transfiere cualquier carga aplicada a las fibras más fuertes y más frágiles.

7.1 CLASES DE COMPUESTOS

Muy parecido a las aleaciones de metal, los ***compuestos*** mezclan dos o más materiales juntos para formar un material con propiedades diferentes a las de cada uno de los materiales padres. Sin embargo, los compuestos difieren de las aleaciones en que cada material padre continúa existiendo en una fase distinta. Los materiales compuestos se clasifican en tres categorías: reforzados con fibras, de partículas y laminares. Los ***compuestos reforzados con fibras***, mostrados en la tabla 7-1, rodean a las fibras fuertes con un material matriz típicamente amorfo que protege y orienta a las fibras.

Tabla 7-1 Clases de compuestos

Categoría del compuesto	*Definición*	*Diagrama*	*Ejemplo*
Reforzado con fibras	Compuesto en el que un material se forma de la matriz externa y transfiere cualquier carga aplicada a las fibras más fuertes y débiles.		Compuestos epóxicos Kevlar
De partículas	Compuestos que contienen grandes números de partículas gruesas para reforzar la matriz.		Concreto
Laminares	Compuesto que se hace al alternar juntas con un adhesivo capas de distintos materiales.		Madera contrachapada
Híbrido	Compuesto hecho de otros materiales compuestos.		Concreto reforzado con barras de refuerzo

Los ***compuestos de partículas*** involucran grandes partículas dispersas en una matriz, mientras que los ***compuestos laminares*** involucran capas alternantes de materiales enlazados uno con otro.

En algunos casos, los ***compuestos híbridos*** son productos que involucran a los compuestos de los compuestos. Por ejemplo, una llanta radial revestida con acero es un compuesto híbrido. El "caucho de la llanta" es un compuesto particular con una matriz de polímero rodeada de partículas de carbono negro. El "caucho de la llanta" encuadra y orienta los filamentos de acero para formar un compuesto de fibra reforzada, mientras que las capas múltiples de estos compuestos de fibra reforzada están unidos para formar un compuesto laminar.

| ***Compuestos de partículas*** |
Compuestos que contienen grandes números de partículas gruesas, como el cemento y la grava que se encuentran en el concreto.

| ***Compuestos laminares*** |
Compuestos que están hechos al alternar juntas con un adhesivo capas de diferentes materiales.

| ***Compuestos híbridos*** |
Materiales compuestos producidos con al menos una fase que por sí sola es un material compuesto.

| ***Matriz*** |
Material en un compuesto que protege, orienta y transfiere carga al material reforzante.

7.2 COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS

Los compuestos reforzados con fibras consisten de dos fases: la fibra y la ***matriz***. En la mayoría de los casos, fibras fuertes y rígidas pero frágiles son puestas en una matriz tenaz pero más dúctil, resultando en un material con excelente proporción de resistencia-peso, rigidez y resistencia a la fatiga. El rol de la fibra es soportar cargas relevantes de tracción en la dirección longitudinal. Las fibras comunes utilizadas para el reforzamiento incluyen carbono, vidrio, polímeros de alto desempeño, poliéster, acero, titanio y tungsteno.

El material matriz rodea a las fibras, las orienta para optimizar su desempeño colectivo, las protege de ataques ambientales y les transfiere la carga. El poliéster es el material matriz más común debido a su relativo bajo costo. Las resinas epóxicas se utilizan cuando hay que tomar en cuenta la contracción y el costo es de menor importancia.

El uso de compuestos reforzados con fibras data desde la antigüedad, cuando los ladrillos se hacían de mezclas de arcilla (la matriz) y paja (la fibra). Los compuestos reforzados con fibras de carbono encuentran su uso en las aplicaciones militares y aeroespaciales, así como en modernos veleros, autos de carrera, bicicletas de rendimiento y equipos de golf y tenis.

7.2.1 // Propiedades de los compuestos reforzados con fibras

Debido a que las fibras fungen como el material de carga en el compuesto, se seleccionan preferentemente fibras fuertes, pero la relación entre la resistencia de la fibra y la resistencia del compuesto no es simple. La matriz debe ser capaz de transferir la carga mecánica a la fibra a través del enlace covalente entre la fibra y la matriz. Muchos factores (incluyendo el tamaño y la orientación de la fibra, la química de superficie de la fibra, la cantidad de cavidades presentes y el grado de curado) influyen en estos enlaces. Sin embargo, el grado y la calidad del enlace entre la fibra y la matriz es el factor más relevante en la resistencia del compuesto.

| ***Dirección longitudinal*** | Dirección de la alineación de las fibras.

| ***Dirección transversal*** | Dirección perpendicular a las fibras en un compuesto.

Los compuestos reforzados con fibras son anisotrópicos con muy diferentes propiedades en la dirección de la alineación de la fibra (***dirección longitudinal***) desde la dirección perpendicular a la fibra (***dirección transversal***). Cuando las fibras están alineadas, todas contribuyen al manejo de una carga longitudinal pero casi no proporcionan reforzamiento a una carga transversal.

Diversos factores importantes influyen en el desempeño de las fibras, incluyendo la longitud y el diámetro, la fracción de fibra y la orientación. Las fibras pueden tener cualquier longitud, desde unos cuantos milímetros de largo en el caso de las fibras picadas (en las que las grandes fibras son cortadas en piezas pequeñas y alineadas al azar) hasta varias millas de largo en el caso de los monofilamentos continuos. La mayoría de las fibras reforzantes varían desde los 7 μm hasta los 150 μm de diámetro. Como punto de referencia, un cabello humano tiene alrededor de 80 micrones de grueso. En general, las fibras más delgadas son más fuertes debido a que su área de superficie reducida los hace menos susceptibles a las imperfecciones de la superficie, y las fibras más grandes soportan la carga más eficientemente que las fibras más cortas debido a que hay menos terminales.

| ***Relación de aspecto*** | Proporción de la longitud al diámetro de la fibra utilizada en un compuesto reforzado con fibra.

La proporción de la longitud de la fibra al diámetro se llama ***relación de aspecto*** (l/d). Claramente, grandes relaciones de aspecto resultan en compuestos más fuertes, pero las fibras más grandes son más difíciles de procesar, son más difíciles de orientar y con frecuencia están limitadas por el tamaño del material compuesto. Muchas veces, los diseñadores de compuestos definen una longitud crítica (l_c) por debajo de la cual la fibra proporciona reforzamiento limitado pero por encima del cual la fibra actúa como si fuera casi infinitamente larga. La ecuación que lo define,

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_i}, \tag{7.1}$$

| ***Wet out*** | Calidad de enlace entre la fibra y la matriz en un material compuesto.

expresa la longitud crítica de la fibra como una función de resistencia a la tracción de la fibra (σ_f), el diámetro de la fibra (d) y la constante empírica (τ_i), que se relaciona con la calidad del enlace entre la fibra y la matriz, llamada ***wet out***. Sin embargo, la calidad del enlace es difícil de caracterizar, y con más frecuencia la longitud crítica se determina por ensayo y error más que por análisis teórico. Si la resistencia a la conformación cortante de la matriz es significativamente más pequeña que τ_i, esa medida con frecuencia reemplaza a τ_i en la ecuación de longitud crítica.

Ejemplo 7-1

Para un compuesto de resina epóxica Kevlar-29, la longitud crítica de la fibra de 13 μm de diámetro resultó ser de 44 mm. Cuando cantidades pequeñas de fibra de vidrio son añadidas al compuesto para mejorar el wet out, la longitud crítica se reduce a 33 mm. Calcule la constante de wet out para el compuesto sin el aditivo de vidrio y con éste.

SOLUCIÓN

La constante de wet out (τ_i) se puede calcular a partir de la ecuación 7.1. Para el compuesto sin fibra de vidrio,

$$\tau_i = \frac{\sigma_f d}{2l_c} = \frac{(2.8 \text{ GPa})(.013 \text{ mm})}{2(44 \text{ mm})} = 4.14 \times 10^{-4} \text{ GPa}$$

Para el compuesto con vidrio,

$$\tau_i = \frac{\sigma_f d}{2l_c} = \frac{(2.8 \text{ GPa})(.013 \text{ mm})}{2(33 \text{ mm})} = 5.52 \times 10^{-4} \text{ GPa}$$

Algunas propiedades mecánicas se pueden predecir con más certeza para el material compuesto. Una simple regla de mezcla aplica bien para las densidades, las conductividades eléctricas y las conductividades térmicas. Si se considera el compuesto consistente de tres materiales —matriz, fibra y poros (espacio vacío)—, entonces las fracciones de volumen (f) de cada uno de estos materiales deben sumar 1 como se muestra en la ecuación 7.2:

$$f_f + f_m + f_v = 1 \quad (7.2)$$

La densidad, la conductividad térmica y la conductividad eléctrica de una cavidad son todas esencialmente de cero y no aparecerán en ecuaciones subsecuentes, pero debe tener cuidado para asegurarse que la presencia de cavidades se tome en cuenta para el cálculo de fracciones de volumen. Las ecuaciones 7.3 a la 7.5 proporcionan las ecuaciones para densidad (ρ), conductividad térmica (k) y conductividad eléctrica (σ) de los compuestos.

$$\rho_c = \rho_m f_m + \rho_f f_f \quad (7.3)$$

$$k_c = k_m f_m + k_f f_f \quad (7.4)$$

$$\sigma_c = \sigma_m f_m + \sigma_f f_f \quad (7.5)$$

Las relaciones para las propiedades mecánicas son más complejas. Cuando una carga de tracción se aplica al compuesto en la dirección del reforzamiento de la fibra (longitudinalmente), la fibra y la matriz comienzan a deformarse. Si la calidad de enlace entre la fibra y la matriz es suficiente, se alargan al mismo rango y experimentan la misma deformación. A esto se le llama ***condición de isodeformación***. Mientras que la fuerza aplicada permanece pequeña, la fibra y la matriz se estiran elásticamente. Cuando se excede la resistencia a la conformación de la matriz ($\sigma_{y,m}$), la matriz comienza la deformación plástica, pero las fibras más fuertes permanecen en la región de estiramiento elástico. En este punto, parte de la carga se pasa a las fibras, y el compuesto no se

| ***Condición de isodeformación*** |
Condición en la que la calidad de enlace entre la fibra y la matriz es suficiente como para que las dos se alarguen en la misma proporción y experimenten la misma deformación.

fractura aún con cargas que destruirían una matriz no reforzada. Debido a que la tensión en el compuesto (σ_c) debe transmitirse por la fibra o la matriz,

$$\sigma_c = \sigma_m f_m + \sigma_f f_f \tag{7.6}$$

Debido a que las deformaciones (ϵ) en las fibras y la matriz son iguales, la ecuación 7.6 se puede reescribir como:

$$\frac{\sigma_c}{\epsilon} = \frac{\sigma_m f_m}{\epsilon} + \frac{\sigma_f f_f}{\epsilon} \tag{7.7}$$

pero la proporción de σ_c/ϵ es apenas el módulo elástico (E). Por lo tanto, el módulo elástico del compuesto (E_c) se puede calcular a partir de

$$E_c = E_m f_m + E_f f_f \tag{7.8}$$

La contribución relativa de la fibra y la matriz para el manejo de la fuerza aplicada se puede calcular a partir de la ecuación 7.9,

$$\frac{F_f}{F_m} \approx \frac{E_f f_f}{E_m f_m} \tag{7.9}$$

en donde F_f y F_m son, respectivamente, las fuerzas aplicadas en las fibras y la matriz.

Debido a que las fibras de reforzamiento son frágiles, comienzan a fracturarse cuando su resistencia a la tracción ($\sigma_{s,f}$) se sobrepasa. No obstante, debido a la natural variación aleatoria de las resistencias a la tracción de las fibras individuales, estas fracturas resultarán por encima de un amplio rango de fuerzas aplicadas. Aun cuando se fracturan las fibras, el compuesto por sí solo puede sobrevivir. La matriz continúa deformándose plásticamente, mientras que las piezas rotas de fibra permanecen enlazadas al material matriz. Así, aun los filamentos rotos continúan fungiendo para alguna función de reforzamiento.

Todo este análisis se basa en la suposición de enlaces de alta calidad entre la fibra y la matriz. Si el enlace es menos fuerte, los enlaces entre la fibra y la matriz se rompen, resultando en la ***extracción de fibra***. Sin ningún enlace entre la fibra y la matriz, la carga no puede transferirse a las fibras y la matriz se comporta como si no estuviera reforzada.

| ***Extracción de fibra*** |
Falla prematura en un compuesto provocada por el enlace inadecuado entre la fibra y la matriz.

Cuando se aplica la carga en la dirección transversal, las fibras esencialmente no proporcionan ningún beneficio de reforzamiento a la matriz. Como tal, las tensiones experimentadas por las fibras y la matriz son las mismas,

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m, \tag{7.10}$$

mientras que los módulos elásticos del compuesto se pueden calcular a partir de la ecuación 7.11,

$$E_c = \frac{E_f E_m}{f_m E_f + f_f E_m} \tag{7.11}$$

A esto se le llama ***condición de isoesfuerzo***.

| ***Condición de isoesfuerzo*** |
Condición en la que las fibras de una matriz esencialmente no ofrecen beneficio de reforzamiento a la matriz cuando se aplica una carga en la dirección transversal, provocando que ambos experimenten esencialmente la misma deformación.

7.2.2 // Impacto de la cantidad y orientación de la fibra

La cantidad de fibra añadida a un compuesto impacta su costo y su desempeño. Debido a que las fibras son responsables del manejo de la carga aplicada, el uso de más fibra resulta en compuestos más fuertes. Sin embargo, cuando la fracción de fibra excede alrededor de 80%, no existe material de matriz suficiente como para rodear y enlazarse completamente con la fibra y transferir con efi-

Ejemplo 7-2

Un compuesto cilíndrico reforzado con fibra con un área transversal de 100 mm^2 se compone de 60% de volumen de una matriz polimérica (densidad = 1.2 kg/m^3), módulo elástico = 3 GPa, resistencia a la tracción = 300 MPa), 35% de fibras reforzantes de fibra de vidrio (las propiedades se encuentran en la tabla 7-2) y 5% de cavidades netas. Se aplica una tensión de 20 MPa al compuesto en dirección longitudinal.

a) Calcule la densidad del compuesto.

b) Calcule el módulo de elasticidad del compuesto en dirección longitudinal.

c) Calcule el módulo de elasticidad del compuesto en dirección transversal.

d) Calcule la fracción de la carga soportada por las fibras.

e) Calcule la deformación en la fibra o la matriz y explique por qué es necesario calcular sólo una de ellas.

SOLUCIÓN

a) La densidad se puede calcular a partir de la regla mezclada dada en la ecuación 7.3:

$$\rho_c = \rho_m f_m + \rho_f f_f = \left(1.2\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)(0.60) + \left(2.58\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)(0.35) = 1.62\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Recuerde que la densidad de un poro es cero pero aun así cuenta para 5% del volumen total.

b) El módulo de elasticidad en la dirección longitudinal se calcula mediante la ecuación 7.8:

$$E_c = E_m f_m + E_f f_f = (3\text{ GPa})(.60) + (22\text{ GPa})(.35) = 9.5\text{ GPa}.$$

c) El módulo de elasticidad en la dirección transversal se calcula mediante la ecuación 7.11:

$$E_c = \frac{E_f E_m}{f_m E_f + f_f E_m} = \frac{(22)(3)}{(.60)(22) + (.35)(3)} = 4.63\text{ GPa}.$$

d) La ecuación 7.9 se utiliza para encontrar la proporción de la carga transmitida por las fibras relativamente a la transmitida por la matriz:

$$\frac{F_f}{F_m} \approx \frac{E_f f_f}{E_m f_m} = \frac{(22\text{ GPa})(.35)}{(3\text{ GPa})(.60)} = 4.3$$

Esta proporción indica que las fibras ostentan 4.3 veces más carga que la matriz.

e) Cuando se supone que la calidad de enlace entre las fibras y la matriz es alta, una carga aplicada en la dirección longitudinal resulta un caso de isoesfuerzo en el que $\epsilon_f = \epsilon_m = \epsilon$. Una vez que la deformación en las fibras se conoce, también se conoce la deformación en la matriz. Para encontrar la deformación en las fibras, es necesario primero

conocer la tensión en las fibras. La tensión se define como la fuerza dividida entre el área transversal:

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A_f}$$

Para determinar la carga en las fibras, se debe calcular la carga total del compuesto:

$$F_c = \sigma_c A_c = (20 \text{ MPa})(100 \text{ mm}^2) = 2\,000 \text{ N}.$$

La carga total en el compuesto es la suma de las cargas en la fibra y la matriz,

$$F_c = F_f + F_m,$$

y parte de este problema (d) concluyó que la fibra tomó 4.3 veces más carga que la matriz, así que:

$$\begin{aligned} F_c &= 4.3\ F_m + F_m \\ 2\,000 \text{ N} &= 5.3\ F_m \\ F_m &= 377 \text{ N} \\ F_f &= 2\,000 \text{ N} - 377.4 \text{ N} = 1\,623 \text{ N}. \end{aligned}$$

El área transversal de las fibras se debe determinar a partir de la fracción de volumen:

$$A_f = A_c f_f = (100 \text{ mm}^2)(.35) = 35 \text{ mm}^2.$$

Así es que la tensión en las fibras está dada por

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A_f} = \frac{1\,623 \text{ N}}{35 \text{ mm}^2} = 46.4 \text{ MPa}.$$

Una vez que se conoce la deformación en la fibra, la tensión se determina a partir del módulo elástico:

$$\epsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{46.4 \text{ MPa}}{22\,000 \text{ MPa}} = 2.11 \times 10^{-3}.$$

El número idéntico se lograría utilizando fracciones de matriz para el mismo cálculo.

ciencia la carga. En la mayoría de los casos, las fibras reforzantes son mucho más caras que el material que rodea a la matriz, haciendo deseable la reducción de la fracción de fibra en el compuesto. Aunque la fracción exacta de fibra varía según la clase de material y su aplicación, la mayoría de los compuestos reforzados con fibras contienen de 35% a 50% de fibras por volumen.

La orientación de las fibras también juega un rol importante en las propiedades de las fibras. Como se muestra en la figura 7-1, los compuestos se pueden hacer con fibras uniaxiales, fibras picadas orientadas aleatoriamente, o con complejas esteras tejidas bidimensionales o tridimensionales. Las fibras

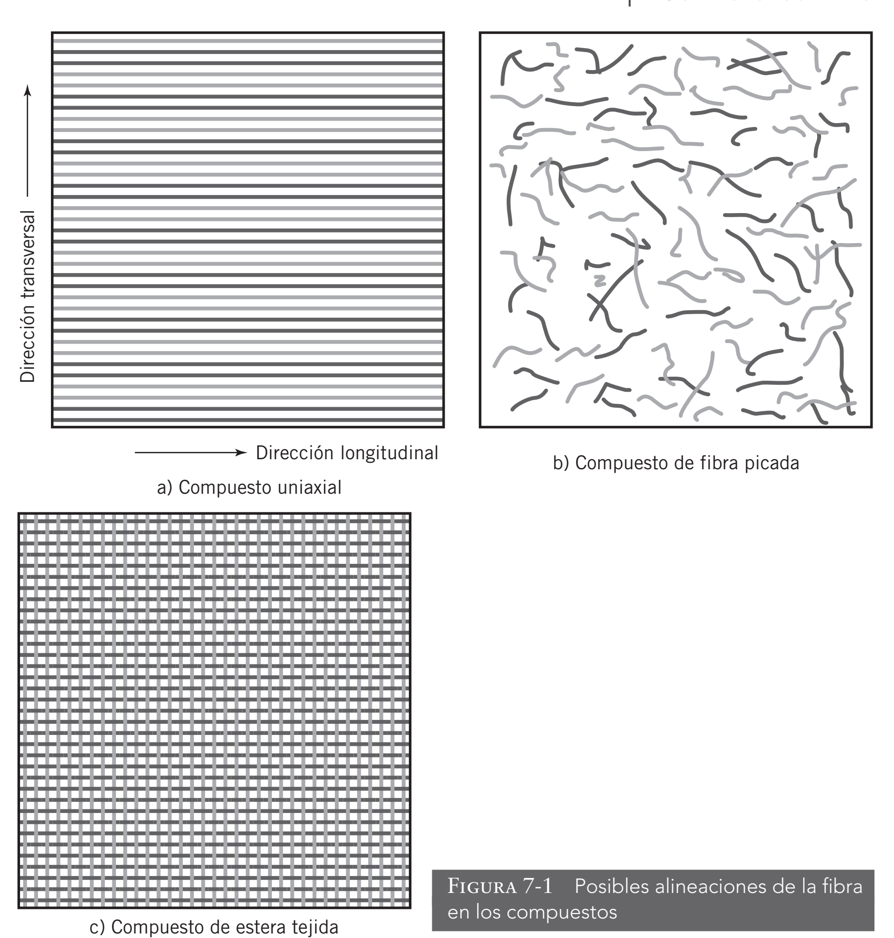


Figura 7-1 Posibles alineaciones de la fibra en los compuestos

uniaxiales hacen que el compuesto tenga significativamente más capacidades de reforzamiento en la dirección longitudinal que en la transversal debido a la alienación casi perfecta de las fibras. Las fibras picadas orientadas aleatoriamente son isotrópicas, proporcionando fundamentalmente las mismas propiedades en todas las direcciones. Debido a que las fibras son más pequeñas y sólo una pequeña fracción se alinea a cualquier dirección de carga aplicada, las capacidades de reforzamiento máximas son menores que en los compuestos uniaxiales. Sin embargo, los compuestos de fibra picada se producen más fácil y de forma menos cara. Cuando se requieren fuerzas más altas y capacidad para soportar cargas en múltiples direcciones se utilizan tejidos bidimensionales y tridimensionales. Con los tejidos, las fibras se pueden alinear en múltiples direcciones, y las cargas aplicadas siempre serán perpendiculares a alguna fracción de las fibras. Sin embargo, mientras más complicado es el patrón de tejido, más complicado y caro el proceso de fabricación.



7.2.3 // Fabricación de compuestos reforzados con fibras

Los compuestos se fabrican a través de una variedad de procesos. Los compuestos de fibra picada simple frecuentemente se hacen mediante la ***formulación de resina***, en la que pedazos de fibra picada se mezclan o se soplan hacia el material de matriz, junto con cualquier agente de curado, aceleradores, diluyentes, rellenos y pigmentos. Si se utiliza una matriz polimérica, el material matriz se

| ***Formulación de resina*** |
Proceso en el que pedazos de fibras picadas son mezclados o soplados hacia el material matriz, junto con cualquier agente de curación, acelerador, diluyente, rellenador o pigmento, para formar un compuesto de fibra picada simple.

| *Pultrusión* |
Proceso utilizado frecuentemente para crear compuestos reforzados con fibras uniaxiales.

| *Itinerante* |
Gran número de hebras de fibra sencilla tejidas en paralelo.

| *Cesta* |
Dispositivo capaz de jalar continuamente los filamentos de múltiples itinerantes diferentes sin detener el proceso.

| *Devanado húmedo de filamentos* |
Proceso de creación de formas más complicadas de compuestos reforzados con fibras a una forma deseada.

| *Moldeo de transferencia de resina* |
Proceso de conversión de esteras o tejidos a compuestos a través del uso de un molde, en el que la estera se coloca y se inyecta con resina a presión suficientemente alta como para permear y rodear la estera tejida.

funde previo a la adición de otros ingredientes, después se vierte en un molde. Cuando una resina epóxica se utiliza como la matriz, la resina se mezcla con un endurecedor y los otros ingredientes se añaden al molde.

Los compuestos uniaxiales con frecuencia se hacen a través de un proceso llamado ***pultrusión*** mostrado en la figura 7-2. En este proceso, gran número de hebras de una sola fibra se tejen en paralelo para formar un ***itinerante***. Muchos de estos itinerantes están conectados en un dispositivo llamado ***cesta*** que permite a los filamentos jalarlos continuamente desde muchos itinerantes diferentes sin tener que detener el proceso. Las fibras se jalan en forma continua desde la cesta a través de un dispositivo tensionante y hacia un baño en donde son cubiertas con el material matriz. Las fibras cubiertas se jalan a través de un troquel calentado que permite el curado de la matriz. Después el compuesto final se corta en la forma deseada.

Formas más complicadas se desarrollan utilizando un proceso relacionado llamado ***devanado húmedo de filamentos*** en el que fibras continuas de itinerantes se jalan a través de un baño de impregnación de resina, luego tejidas en la forma deseada como se muestra en la figura 7-3. Cuando cantidades suficientes de fibras impregnadas de resina se han tejido alrededor de la parte, ésta se mueve hacia un horno de curación para producir un compuesto con la forma deseada.

Los tejidos y las esteras se convierten a compuestos utilizando una técnica de ***moldeo de transferencia de resina*** mostrada en la figura 7-4. La estera tejida de fibra se coloca en un espacio entre un molde de fondo y un molde superior. Se inyecta la resina en una cavidad en el molde superior con presión suficiente

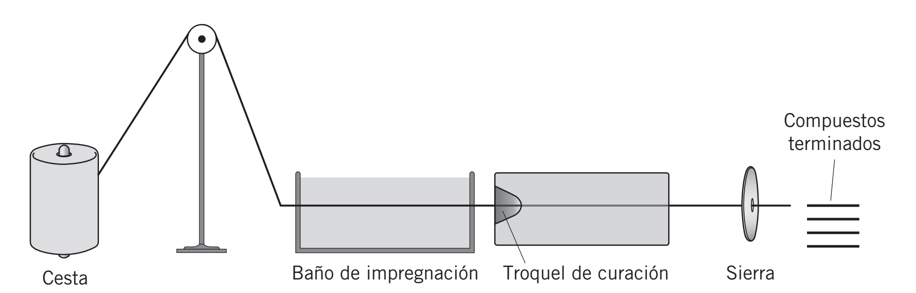


Figura 7-2 Proceso de pultrusión

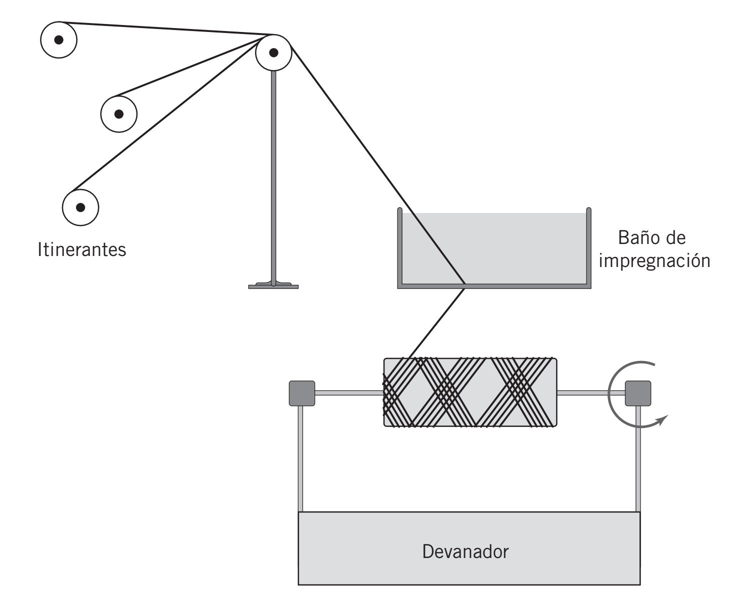




Figura 7-3 Devanado húmedo de filamentos

Canal de inyección
Molde superior
Estera
Molde inferior

Figura 7-4 Moldeo de transferencia de resina

Carrete de fibra
Baño de impregnación
Horno
Prepreg
Carrete de tejido



Figura 7-5 Proceso de preimpregnación

como para asegurar que penetrará y rodeará la estera tejida. Los moldes se curan utilizando una combinación de calor y presión, creando una parte de compuesto en la forma de los moldes.

Todas la técnicas de producción comentadas hasta ahora involucran cubrir las fibras con materiales matriz inmediatamente previo a fabricar la parte de compuesto. Sin embargo, es ventajoso tener un paquete de fibra que ya se impregnó con el material matriz y que puede convertirse al compuesto sin ningún procesamiento adicional. Esta fibras precubiertas son conocidas como ***prepreg***, y al proceso de su manufactura se le llama ***preimpregnación***. Durante este proceso, las fibras son inmersas en una solución de resina o cubiertas con pequeñas cantidades de polímero fundido o breas como se muestra en la figura 7-5. Las fibras cubiertas se calientan ligeramente en un horno para asegurar que la cubierta se adhiera a las fibras. El prepreg resultante se guarda en refrigeración hasta que está listo para hacer un compuesto.

El prepreg ofrece una ventaja significativa en que el material matriz ya está dispersado en las fibras. Por lo tanto, la inyección de alta presión de la resina en un molde no es necesaria. El prepreg en general es tejido en la estera deseada, recortado y puesto en un molde. Con frecuencia se requieren varias capas para obtener el grosor deseado. El molde se pone en una bolsa de vacío y luego se cura en una autoclave en donde la parte está sujeta a presión y calor.

| ***Prepreg*** |
Paquete de fibra ya impregnado con material matriz que puede convertirse en un compuesto sin necesidad de procesamiento adicional.

| ***Preimpregnación*** |
Proceso de creación de prepregs al sumergir las fibras en un baño de resina y calentándolas ligeramente para asegurar que la cubierta se adhiera.

7.2.4 // Selección de fibras reforzantes

Todas las fibras reforzantes comparten la necesidad de una alta resistencia a la tracción, pero otras consideraciones, incluyendo el costo y la densidad, ejercen influencias fuertes en la selección. La resistencia específica(σ_{sp}) de una fibra se define como la resistencia a la tracción de la fibra dividida entre su densidad como se muestra en la ecuación 7.12:

$$\sigma_{sp} = \frac{\sigma_s}{\rho}. \qquad (7.12)$$

El uso de resistencia específica permite que la proporción resistencia-a-peso sea factorizado en decisiones.

Tabla 7-2 Propiedades de fibras reforzantes comunes

Clase de fibra	*Densidad (kg/m^3)*	*Resistencia a la tracción (GPa)*	*Resistencia específica (GPa)*	*Módulo elástico (GPa)*
Óxido de aluminio	3.97	10.0	2.5	360
Fibra de carbono (basada en PAN)	1.75	3.5	2.0	230
E-glass (fibra de vidrio unidireccional)	2.58	3.4	2.6	22
Kevlar-29	1.44	2.8	1.9	122
Kevlar-49	1.44	4.0	2.8	131
Molibdeno	10.2	2.2	0.2	327
Poliéster	1.4	0.2	0.14	4.3
Carburo de silicio	3.0	20.0	6.6	150
Acero (alta tracción)	7.9	2.3	0.3	210
Titanio	4.5	8.3	1.8	116
Tungsteno	19.3	2.9	0.15	21.1
UHMWPE (Polietileno de ultra alto peso molecular)	0.97	2.6	2.7	210

Las fibras reforzantes están hechas de cerámicos, polímeros de alto desempeño, metales o fibras de carbono. La tabla 7-2 resume las propiedades clave para diversas fibras reforzantes comunes. Las fibras de cerámica como el carburo de silicio y el óxido de aluminio son rígidas y fuertes en lugar de densas. Con frecuencia, las fibras de vidrio (e-glass) se seleccionan debido a una mezcla de alta resistencia, resistencia química y bajo costo, aunque debe tenerse mucho cuidado para evitar dañar las fibras durante el manejo. Las fibras de tungsteno y molibdeno encuentran usos significativos en las aplicaciones del espacio y soldaduras debido a sus altos puntos de fusión. Las fibras de acero son pesadas pero añaden resistencia y conductividad térmica al compuesto. En adición a poseer una resistencia específica excepcional para un metal, las fibras de titanio están inertes en el cuerpo humano y son capaces de la ***oseointegración***, o de formar una conexión directa con huesos vivos, haciéndolos ideales para compuestos dentales y aplicaciones de reemplazo de articulaciones.

| ***Oseointegración*** |
Proceso en el que la hidroxiapatita se vuelve parte de la matriz de hueso creciente.

Las fibras de polímero de alto desempeño, incluyendo el Kevlar y el UHWMPE, se utilizan generalmente con matrices de poliéster o epóxicos y encuentran su uso relevante en los materiales resistentes a las balas, material deportivo, balatas y llantas. Cuando las necesidades de desempeño superan las preocupaciones de costos, las fibras de carbono son con frecuencia el material reforzante a elegir. Las fibras de carbono tienen alta resistencia específica y mantienen sus propiedades a temperaturas elevadas. Los compuestos de fibras de carbono encuentran amplio uso en armazones de coches de carreras, naves espaciales y algunas aplicaciones de la construcción, incluyendo el puente Westgate sobre el Río Yarra, en Melbourne, Australia.

7.2.5 // Selección de materiales matriz

La mayoría de los compuestos de fibra reforzada utilizan materiales poliméricos como la fase matriz, aunque algunas aplicaciones se benefician del uso de metales o cerámicos. Cuando las propiedades mecánicas de la matriz no son cruciales para la aplicación, las resinas de poliéster proporcionan la opción más económica. La mayoría de los compuestos reforzados con fibras utilizan una resina de poliéster ortoftálica que mezcla los monómeros de poliéster con el estireno para reducir la viscosidad. Una ***resina de poliéster*** isoftálica proporciona una mayor resistencia al agua y se elige cuando el compuesto estará expuesto a ambientes

| ***Resina de poliéster*** |
La opción más económica para un material matriz en compuestos en situaciones en las que las propiedades mecánicas de la matriz no son cruciales para la aplicación.

acuáticos, como el casco de un bote. Cuando se va a usar resina, un catalizador se añade al líquido pálido y viscoso para iniciar la polimerización. Una reticulación, llamada ***curado***, se lleva a cabo para solidificar la resina de poliéster.

$ Las ***resinas epóxicas*** son mucho más caras pero proporcionan propiedades mecánicas mejoradas y resistencia ambiental excepcional. La mayoría de los compuestos utilizados en la industria de aeronaves se hacen con resinas epóxicas debido a sus propiedades superiores. Las resinas epóxicas tienen un color ámbar característico y por lo general pueden curarse a temperaturas ambiente con la adición de un ***endurecedor***, aunque el proceso puede acelerarse al calentarlo. Los endurecedores difieren de los catalizadores en que los endurecedores se incorporan en el polímero resultante a través de un polímero de adición. La mayoría de los endurecedores contienen grupos amino.

Las ***resinas de éster de vinilo*** representan un compromiso entre las ventajas económicas de las resinas de poliéster y las propiedades excepcionales de las resinas epóxicas. Los ésteres de vinilo son más tenaces y más resilientes que los poliésteres y tienen su aplicación industrial en tuberías y tanques de almacenamiento. Los ésteres de vinilo generalmente requieren temperaturas elevadas para curarse en su totalidad.

Aunque los tres sistemas apenas comentados comprenden las más comunes resinas poliméricas, otros materiales poliméricos encuentran su uso en casos especiales. $ Las ***resinas fenólicas*** producen compuestos con muchas cavidades y propiedades mecánicas pobres pero ofrecen un nivel de resistencia al fuego. Las resinas de poliuretano proporcionan un nivel de resistencia química y ofrecen dureza relevante pero son débiles en compresión. Las ***resinas de poliamida*** son extremadamente caras y encuentran su uso solamente en las aplicaciones de alta gama, como los misiles y las aeronaves militares, pueden mantener sus propiedades a una temperatura por arriba de los 250° C.

Los ***compuestos de matriz metálica*** ofrecen una alternativa a las matrices poliméricas más comunes. Aunque alguna vez se limitaban a las aplicaciones militares y aeroespaciales debido a sus altos costos, los compuestos de matriz metálica están haciendo camino hacia la industria de productos deportivos, la industria automotriz y los materiales electrónicos. La matriz metálica más común es el aluminio debido a su alta resistencia específica y su relativo bajo costo. Comparadas con las matrices poliméricas, las matrices metálicas proporcionan alta resistencia, resistencia ambiental mejorada (incluyendo el hecho de que no se queman), conductividad térmica mucho más grande, resistencia a la abrasión mejorada y la capacidad de operar a temperaturas elevadas.

Los ***compuestos de matriz cerámica (CMC)*** fungen para un propósito diferente al de otros materiales comentados en esta sección. Cuando las fibras de cerámico se añaden a una matriz de un material cerámico diferente, la tenacidad de la fractura del compuesto se incrementa significativamente mientras se mantiene la capacidad de soportar altas temperaturas y ambientes corrosivos. Por esta razón, los CMC generalmente reemplazan a los cerámicos estándares para aplicaciones en las que la tenacidad de la fractura es una preocupación principal. Muchos expertos anticipan que los CMC se convertirán en las características estándares en maquinaria avanzada, lo que podría hacer innecesarios a los fluidos enfriadores e incrementar la eficiencia dramáticamente. Los CMC ligeros también reemplazan a las superaleaciones, permitiendo una reducción de peso significativa.

| ***Curado*** |
Endurecimiento o tenacidad de un material polímero a través de un entrecruzamiento de cadenas de polímeros.

| ***Resinas epóxicas*** |
Resinas utilizadas como matrices en materiales compuestos que son más caras que la resina de poliéster pero proporcionan propiedades mecánicas mejoradas y resistencia ambiental excepcional.

| ***Endurecedor*** |
Sustancia añadida a la resina epóxica que hace que se entrecruce, el endurecedor se incorpora en el polímero resultante.

| ***Resinas de éster de vinilo*** |
Material de matriz polimérica que combina las ventajas económicas de las resinas de poliéster y las propiedades excepcionales de las resinas epóxicas.

| ***Resinas fenólicas*** |
Materiales matriz que tienen muchas cavidades y propiedades mecánicas pobres pero ofrecen un nivel de resistencia al fuego.

| ***Resinas de poliamida*** |
Materiales de matriz polimérica que son extremadamente caros y usados sólo en aplicaciones de alta gama, debido a su habilidad para mantener sus propiedades a temperaturas por arriba de los 250° C.

| ***Compuestos de matriz metálica*** |
Compuestos que utilizan un metal como el material matriz en lugar de matrices poliméricas más comunes.

| ***Compuestos de matriz cerámica (CMC)*** |
Adición de fibras de cerámico a una matriz de un material cerámico diferente para incrementar significativamente la tenacidad a la fractura del compuesto.

7.3 COMPUESTOS DE PARTÍCULAS

Los compuestos de partículas generalmente no pueden proporcionar la misma resistencia que los compuestos reforzados con fibras pero son mucho más fáciles de fabricar y mucho menos caros. Los compuestos de

partículas contienen un gran número de partículas aleatoriamente orientadas llamados ***agregados***, las cuales ayudan al compuesto a soportar cargas de compresión. Las propiedades finales de los compuestos de partículas son más fáciles de predecir debido a que están libres de las cuestiones de orientación experimentadas por los compuestos reforzados con fibras. Los compuestos de partículas son isotrópicos, teniendo las mismas propiedades en todas las direcciones.

| ***Agregados*** |
Partículas duras, orientadas aleatoriamente en un compuesto de partículas que ayuda al compuesto a soportar cargas de compresión.

| ***Agregados finos*** |
Partículas agregadas con un diámetro de menos de 0.25 pulgadas.

| ***Agregados gruesos*** |
Partículas agregadas con un diámetro más grande de 0.25 pulgadas.

| ***Concreto*** |
Compuesto de partículas comercial más importante, el cual consiste de una mezcla de grava o piedra triturada y cemento Portland.

| ***Añadiduras*** |
Moléculas añadidas a un compuesto para reforzar o alterar sus propiedades específicas.

| ***Catalizadores de hidratación*** |
Catalizadores que alteran el rango de hidratación del cemento Portland.

| ***Aceleradores*** |
Catalizadores de hidratación que aceleran el rango de hidratación en el cemento Portland.

| ***Retardadores*** |
Catalizadores de hidratación que disminuyen el rango de hidratación en el cemento Portland.

| ***Pigmentos*** |
Agentes colorantes que no se disuelven en el polímero.

| ***Arrastradores de aire*** |
Aditivos que provocan que se formen burbujas de aire y se distribuyan alrededor del concreto para permitirle soportar ciclos de expansión congelación-descongelación sin fallar.

| ***Plastificadores*** |
Aditivos que provocan hinchazón, lo que le permite a las cadenas de polímero pasar sobre una y otra más fácilmente, haciendo al polímero más suave y flexible. También se usa para disminuir la viscosidad de la pasta del cemento para hacer más fácil fluir el concreto a su forma final.

En general, los materiales agregados son más fuertes que los que rodean a la fase de matriz, pero las moléculas adyacentes agregadas no pueden ligarse entre sí. La fase de matriz liga a las partículas agregadas más duras a que se junten, pero también limita la resistencia del compuesto. Un compuesto hecho de agregados fuertes pero con una matriz débil, fallará bajo cargas de tracción relativamente bajas. Las partículas de agregados incrementan el módulo del compuesto mientras reducen la ductilidad y permeabilidad del material matriz.

Las moléculas de agregados generalmente reducen las deformaciones dependientes del tiempo, incluyendo la fluencia lenta, y casi siempre son mucho menos caras que el material matriz. Las partículas de agregados de menos de 0.25 pulgadas de diámetro se clasifican como ***agregados finos***, mientras que las partículas más grandes se clasifican como ***agregados gruesos***.

7.3.1 // Concreto

El compuesto de partículas comercial más importante es el ***concreto***, mezcla de grava o piedra triturada (el agregado) y cemento Portland (la matriz). Técnicamente, el término concreto se refiere a cualquier compuesto de partículas que mezcla agregados de mineral con una matriz de ligadura, pero ahora el término generalmente aplica al concreto de cemento Portland. El primer uso del cemento Portland en el concreto data de 1756, cuando el ingeniero británico John Smeaton mezcló el cemento con ladrillo triturado y guijarros. El concreto es ahora ubicuo en la construcción y pavimentación; sólo en Estados Unidos hay más de 45 000 millas de carreteras interestatales de concreto más un sinnúmero de caminos y vías menores. Más de 6 mil millones de toneladas de concreto se producen cada año con cerca de 40% utilizadas en China.

En adición al cemento Portland y los agregados, el concreto usa agua (para iniciar las reacciones de hidratación en el cemento como se comentó a detalle en el capítulo 6), ***añadiduras*** (aditivos al concreto diseñados para alterar propiedades) y rellenos (también comentados en el capítulo 6). Los agregados cuentan alrededor de 75% del volumen total del concreto, pero las propiedades del compuesto son dominadas por el cemento Portland más débil en la matriz. Las añadiduras típicamente cuentan en menos de 5% del volumen total del concreto y sirven para cuatro propósitos fundamentales:

1. ***Catalizadores de hidratación*** que alteran el rango de hidratación del cemento Portland. Aquellos que aceleran la hidratación se llaman ***aceleradores***, y los que la disminuyen se llaman ***retardadores***.
2. Los ***pigmentos*** proporcionan color al concreto para valor estético.
3. Los ***arrastradores de aire*** hacen que se formen pequeñas burbujas de aire y se distribuyan a través del concreto, lo cual permite que el concreto soporte los ciclos de expansión de congelamiento-descongelamiento sin fallar.
4. Los ***plastificadores*** reducen la viscosidad de la pasta de cemento, haciendo que el concreto fluya más fácil a su forma final.

El concreto desarrolla varias propiedades mecánicas deseables, incluyendo excelente resistencia a la tracción, excelente resistencia química y a la humedad y excelente estabilidad de volumen, pero tiene poca resistencia a la tracción. Las propiedades mecánicas del concreto se relacionan con la proporción agua-cemento; el tamaño, la forma y la composición de los agregados utilizados, y la mezcla de cemento y rellenos.

La proporción agua-cemento ejerce la mayor influencia en la resistencia y durabilidad del concreto. Cuando la proporción agua-a-cemento es muy alta, se produce un gel húmedo y resulta en un concreto débil y muy susceptible al clima. Bajar la proporción agua-cemento incrementa la resistencia pero presenta dos dificultades por sí mismo. El ***American Concrete Institute (ACI)/Instituto Americano del Concreto*** requiere que esté presente suficiente agua para permitir al concreto curarse por al menos siete días para lograr que cualquier cemento sin reacción se hidrate. Adicionalmente, se debe añadir suficiente agua para lograr que el concreto sea trabajado en todas las partes del molde o marco. Para aliviar estos problemas, pequeñas cantidades de añadiduras se incorporan al concreto. Los arrastradores de aire atrapan las pequeñas burbujas a través del concreto, lo que mejora su durabilidad y funge como lubricante, reduciendo la necesidad de agua. Adicionalmente, se añaden los plastificadores, lo que significativamente mejora las características de flujo del concreto y reduce la necesidad de agua.

| ***American Concrete Institute (ACI)*** |
Sociedad técnica dedicada al mejoramiento del diseño, construcción y mantenimiento de las estructuras de concreto.

El tamaño de los agregados afecta casi todas las propiedades mecánicas del concreto, incluyendo la resistencia a la fatiga, la resistencia a la humedad y la rigidez. Los pequeños agregados producen concreto más fuerte pero son más duros para trabajar con un módulo de elasticidad de impacto negativo y resistencia a la fluencia lenta. Típicamente, una distribución de tamaños de partículas de agregados se usa con el fin de que partículas más pequeñas llenen algo del espaciado de cavidades entre las partículas más grandes, como se muestra en la figura 7-6, por lo tanto mejorando la interacción entre partículas de agregados.

La distribución de tamaños de partículas se obtiene al pasar el agregado a través de platos de cedazo en un proceso llamado ***gradación***. En 1907 William Fuller y Sanford Thompson mostraron que la máxima densidad de embalaje podría lograrse cuando se satisface la ecuación 7.13:

| ***Gradación*** |
Proceso de pasar el agregado a través de platos de cedazo para adquirir distribuciones de tamaños de partículas.

$$P = \left[\frac{d}{\text{D100}}\right]^{0.5}, \tag{7.13}$$

en donde P es el porcentaje de partículas que pasa a través de un tamaño de cedazo dado, d es el diámetro de la partícula y D100 es el diámetro de la partícula de agregado más grande. El Departamento de Transportación utiliza un ***parámetro de Fuller-Thompson*** de 0.45 en vez de 0.5 en el exponente de la ecuación 7.13.

| ***Parámetro de Fuller-Thompson*** |
Parámetro utilizado en la ecuación usada para determinar la densidad de empaquetamiento máximo en el concreto.

La forma de las partículas de los agregados también impacta a las propiedades. Los guijarros lisos tienen una proporción superficie-área-a-volumen mucho más pequeña que los fragmentos de roca rotos de forma irregular. Por lo tanto, se requiere significativamente más cemento para lograr el mismo grado de enlace entre el agregado de guijarro liso y la matriz. De manera similar, la química de superficie del agregado impacta en qué tan efectivamente puede enlazarse con la matriz de cemento. Por ejemplo, la caliza ($CaCO_3$) se enlaza mucho más fácil con el cemento Portland que la grava o muchos otros tipos de agregados.


a)

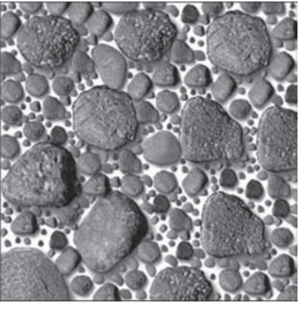

b)

Figura 7-6 Alteraciones en el empaquetamiento entre
a) Partículas grandes uniformes relativamente
b) Partículas graduadas

La resistencia a la compresión del concreto se mide probando muestras endurecidas a temperatura constante y 100% de humedad durante 28 días. Una muestra cilíndrica de 6 pulgadas de diámetro y 12 pulgadas de longitud se prueba para las fallas en compresión uniaxial, como se describe en el capítulo 3. La ***resistencia máxima a la compresión de 28 días*** (f_c) por lo general sucede cerca de una deformación de 0.002, pero la curva de esfuerzo-deformación para el concreto es altamente no lineal. Como resultado, el módulo de elasticidad varía según el nivel de tensión. El ACI especifica un ***módulo secante de elasticidad efectivo*** (E_c) de

| ***Resistencia máxima a la compresión de 28 días*** |
Resistencia a la compresión del concreto a partir de una muestra probada que fue endurecida a temperatura constante y 100% de humedad durante 28 días.

| ***Módulo secante de elasticidad efectivo*** |
Módulo secante de elasticidad especificado por el Instituto Americano del Concreto para el concreto que cuenta para la tendencia del módulo de elasticidad para la variación del concreto con el nivel de tensión.

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f'_c} \tag{7.14}$$

en donde E_c está en MPa y w_c es la densidad del concreto (típicamente 2 320 kg/m^3).

La resistencia a la tracción del concreto varía enormemente pero tiene rangos entre 0.08 f'_c y 0.15 f'_c. La resistencia a la tracción se mide cargando una viga de concreto hacia la falla concentrando una carga en su centro. La máxima resistencia a la tracción al fondo de la superficie de la viga, llamado ***módulo de ruptura*** (f_r), se puede calcular a partir de ecuaciones estándares de esfuerzo de la viga. Sin embargo, debido a que la resistencia a la tracción del concreto es mucho más pequeña que su resistencia a la compresión, el concreto siempre falla en tensión, aun cuando se apliquen cargas de compresión. Como tal, el módulo de ruptura se puede correlacionar con la resistencia máxima a la compresión a 28 días. El código de ACI proporciona

| ***Módulo de ruptura*** |
Resistencia máxima a la tensión en el fondo de la superficie de una viga de concreto.

$$f_r = 0.7\sqrt{f'_c}. \tag{7.15}$$

La presencia de muchas grietas finas a través del concreto significativamente perjudica la resistencia a la tracción, mientras que tiene un pequeño efecto en la resistencia a la compresión. Cuando el concreto es puesto bajo tensión, las concentraciones de esfuerzo se desarrollan en las puntas de las grietas, resultando en esfuerzos locales muy importantes como para alargar las grietas. A medida que la grieta crece, el área no dañada se encoge, la tensión se eleva y surge la falla.

Debido a que casi todas las aplicaciones estructurales requieren la habilidad de soportar algún nivel significativo de fuerzas de tracción, los materiales reforzantes son usualmente añadidos al concreto para manejar las cargas de tracción. Aunque las fibras de vidrio, poliméricas y aun de carbono se han añadido al concreto, los materiales reforzantes más comunes son las barras reforzantes de acero deformado (***barras de refuerzo***), como la que se muestra en la figura 7-7. La barra de refuerzo se fabrica en diámetros en un rango de 0.375 pulgadas a 2.25 pulgadas y se categoriza según el ***tamaño de barra***, en el que cada número representa 0.125 pulgadas adicionales. Por lo tanto, el tamaño de barra 3 se referiría a una barra de refuerzo de 0.375 pulgadas de diámetro, mientras que el tamaño de barra 10 representaría una muestra de 1.25 pulgadas. La tabla 7-3 resume las propiedades mecánicas de la barra de refuerzo.

| ***Barras de refuerzo*** |
Barras reforzantes de acero deformado para reforzar la habilidad del concreto para manejar cargas de tracción.

| ***Tamaño de barra*** |
Categorización del diámetro de la barra de refuerzo, con cada número representando 0.125 pulgadas adicionales.

La adición de una barra de refuerzo crea un nuevo compuesto con la barra de refuerzo haciendo básicamente el rol del material de fibra reforzante y el concreto como la matriz orientadora y de transferencia de carga. En esencia, todos los puntos comentados en la sección 7.2 con compuestos reforzados por fibras aplican al concreto reforzado con barra de refuerzo.



Figura 7-7 Fotografía de una muestra de barra de refuerzo

Cortesía de James Newell

Tabla 7-3 Propiedades de la barra de refuerzo

Número de barra	*Diámetro (pulg)*	*Área transversal (pulg^2)*	*Peso nominal (lb_m/pie)*
3	0.375	0.11	0.376
4	0.500	0.20	0.681
5	0.625	0.31	1.043
6	0.750	0.44	1.502
7	0.875	0.60	2.044
8	1.000	0.79	2.670
9	1.128	1.00	3.400
10	1.270	1.27	4.303
11	1.410	1.56	5.313

7.3.2 // Asfalto (concreto de asfalto)

El otro compuesto de partículas más comercial es el concreto de asfalto (también conocido como cemento de asfalto) o, más comúnmente llamado ***asfalto***. Por cualquier nombre, el asfalto es el material hormigonado utilizado en carreteras y estacionamientos. Como el concreto tradicional, el concreto de asfalto es una mezcla de agregados minerales y una fase de ligadura del asfalto, una fracción de alto peso molecular producida a partir de la destilación del petróleo. A diferencia del concreto tradicional, el cual se cura a una forma permanente a través de una compleja serie de reacciones de hidratación, el concreto de asfalto puede refundirse y reformarse muchas veces. De hecho, el asfalto es el material más reciclado del mundo, aunque el material reciclado no mantiene el mismo nivel de resistencia a la humedad como el asfalto nuevo.

El uso del asfalto en lugar del concreto en las carreteras tiene algunas desventajas. El costo inicial del asfalto es menor, pero una carretera de concreto típica durará el doble de tiempo. El asfalto se deforma mientras más pesadas sean las cargas de los camiones y otros vehículos grandes, haciéndolo menos apropiado para carreteras principales utilizadas por transportistas de carga. También, el asfalto es menos resistente a los resbalones y absorbe el calor, haciéndolo con frecuencia muy caliente para caminar durante los meses de verano.

La mayoría del asfalto utilizado en las carreteras principales se produce a través de un ***proceso de concreto de asfalto de mezcla caliente (HMAC)***. El asfalto es suavizado mediante el calentamiento a más de 160° C antes de mezclarlo con los agregados, entonces se pone el pavimento y se compacta a 140° C. El proceso libera cantidades significativas de dióxido de carbono y vapores orgánicos y genera un aroma característico. La cantidad de emisiones de vapor se puede reducir añadiendo a la mezcla zeolitas (materiales porosos) como silicato de aluminio sódico o ceras. Las zeolitas reducen la temperatura del ablandamiento del asfalto a aproximadamente 25° C, llevándolo a un ***proceso de concreto de asfalto de mezcla tibia (WAM)***. Aunque la tecnología reduce las emisiones, bajan los costos y hacen un ambiente de trabajo más placentero, la industria de la construcción se ha visto lenta en la aceptación del cambio. Durante los años setenta, la industria intentó un proceso de mezcla tibia utilizando humedad del agregado, pero los niveles inconsistentes de humedad en el agregado guiaron a propiedades inconsistentes y casi al abandono del proceso durante un cuarto de siglo.

El ***concreto de asfalto de mezcla fría*** resulta de la adición de agua y moléculas surfactantes al asfalto antes de mezclarlo con el agregado. Cuando el

| ***Asfalto*** |
Mezcla de hidrocarburos de alto peso molecular salidos de la destilación de petróleo. También es el nombre común usado para el concreto de asfalto.

| ***Proceso de concreto de asfalto de mezcla caliente (HMAC)*** |
Proceso utilizado para producir más asfalto en vías principales, en las que el asfalto se calienta a 160° C antes de mezclar el agregado y luego colocado y compactado a 140° C.

| ***Proceso de concreto de asfalto de mezcla tibia (WAM)*** |
Proceso de creación de concreto de asfalto añadiendo zeolitas para bajar la temperatura de reblandecimiento hasta 25° C. Esto reduce la emisión liberada y el costo, y crea condiciones de trabajo más placenteras.

| ***Concreto de asfalto de mezcla fría*** |
Concreto de asfalto creado al añadir agua y moléculas surfactantes al asfalto, resultando en la creación de concreto de asfalto similar al que se forma a través del proceso de concreto de asfalto de mezcla caliente (HMAC). Esto sirve como el mecanismo principal para el reciclaje del suelo contaminado por petróleo.

agua se evapora, el concreto de asfalto resultante toma las propiedades similares al que se produce con el proceso HMAC. Esta técnica es generalmente aplicada sólo a los baches en el pavimento existente o en vías de bajo volumen. El asfalto de mezcla fría también funge como el mecanismo principal de reciclaje para los suelos contaminados por petróleo.

7.4 COMPUESTOS LAMINARES

| *Madera contrachapada* | El tipo más común de compuesto laminar, consistente de capas delgadas de chapa de madera unidas con adhesivos.

| *Bandeo cruzado* | En la madera contrachapada, el grano de la chapa de madera está desviada 90 grados de su vecino, provocando que la madera contrachapada sea más resistente a la deformación y el encogimiento que la madera normal.

| *Compuesto sándwich* | Compuesto utilizado en situaciones en los que se requiere resistencia pero el peso es un factor significativo. Usualmente hecha de hojas de cara fuerte en los extremos exteriores del compuesto con un material de baja densidad hecho sándwich por dentro, frecuentemente en una estructura de panal, lo que añade rigidez y resistencia a la tensión perpendicular.

| *Hojas de cara* | Materiales típicamente muy fuertes usados como los extremos exteriores de un compuesto sándwich.

| *Estructura de panal* | Forma común utilizada para el material de baja densidad en los compuestos sándwich para añadir rigidez y resistencia a las tensiones perpendiculares.

Los compuestos laminares consisten de capas alternantes de materiales bidimensionales con orientación anisotrópica conectada mediante capas de materiales matriz. El compuesto laminar más común es la ***madera contrachapada***, la cual consiste de delgadas capas de chapa de madera unidas por adhesivos. La selección de las chapas y el adhesivo depende de la aplicación deseada. La madera contrachapada es más resistente al encogimiento y a la deformación que la madera regular debido al ***bandeo cruzado***, así es que el grano de la madera en cada hoja de chapa es compensado a 90 grados de sus vecinos.

Cuando se diseña la madera contrachapada para su uso decorativo, la chapa de la superficie puede venir del abedul, maple, caoba u otras maderas duras, mientras que las capas internas generalmente están hechas de pinos suaves menos caros. La mayoría de la madera contrachapada contiene tres, cinco o siete capas de chapas, cada una de 0.125 pulgadas de espesor. La madera contrachapada diseñada para usos interiores, típicamente utiliza una resina de fenol formaldehído que no es cara y se disuelve en agua; la madera contrachapada para exteriores utiliza una resina de fenol-resorcinol más cara pero más robusta.

Otros compuestos laminares comerciales incluyen los parabrisas de seguridad de vidrio (comentados en el capítulo 1), los esquís de nieve (hechos originalmente de capas de fibra de vidrio y madera, pero ahora hechos con frecuencia de mezclas más complicadas que incluyen capas de polietileno sinterizado, acero, hule, carbono, fibra de vidrio y madera) y el material de hule de las llantas de los automóviles, el cual contiene 28% de partículas de carbono negro barato en una matriz de poliisobutileno.

En las aplicaciones aeroespaciales, en donde se requiere resistencia pero el peso es un factor significativo, un patrón de apilado más complejo se utiliza para las capas, llevando a la formación de un ***compuesto sándwich***. Frecuentemente se utilizan fuertes ***hojas de cara*** en los extremos exteriores del compuesto. Estas hojas de cara usualmente están hechas de materiales muy fuertes como aleaciones de titanio, o matas de compuesto reforzado con fibras, ya que son responsables del manejo de la mayoría de las cargas y tensiones aplicadas. Entre las hojas de cara es frecuente que un material de baja densidad se forme en la ***estructura de panal*** mostrada en la figura 7-8, y se use para añadir rigidez y resistir tensiones perpendiculares. Las propiedades de los materiales de panal dependen del tamaño de la célula y el grosor y la fuerza del material de red. En aplicaciones simples, el cartón se utiliza como el material de panal, pero el aluminio o polímeros de alto desempeño son necesarios para las aplicaciones aeroespaciales y otras de alta gama.

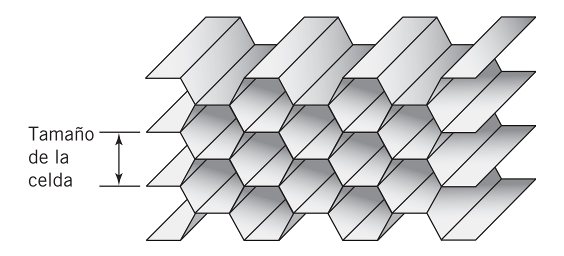
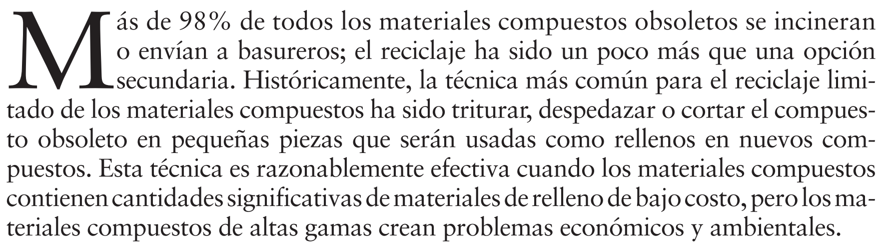


Figura 7-8 Estructura de panal utilizada en el compuesto sándwich

¿Qué les pasa a los compuestos obsoletos?

7.5 RECICLAJE DE LOS MATERIALES COMPUESTOS



Más de 98% de todos los materiales compuestos obsoletos se incineran o envían a basureros; el reciclaje ha sido un poco más que una opción secundaria. Históricamente, la técnica más común para el reciclaje limitado de los materiales compuestos ha sido triturar, despedazar o cortar el compuesto obsoleto en pequeñas piezas que serán usadas como rellenos en nuevos compuestos. Esta técnica es razonablemente efectiva cuando los materiales compuestos contienen cantidades significativas de materiales de relleno de bajo costo, pero los materiales compuestos de altas gamas crean problemas económicos y ambientales.

La digestión ácida se utiliza para consumir la matriz y permitir el recosechado de las fibras de carbono caras, pero esta técnica está repleta de problemas. La mezcla acídica resultante es altamente tóxica, y el procesamiento requerido descompensa la mayoría de los beneficios económicos del reciclaje. Los principales fabricantes de aeronaves están desarrollando análisis de ciclo de vida detallados para determinar formas ambientalmente benignas para reutilizar y reciclar los materiales compuestos.

Como es frecuente el caso, Europa está a la vanguardia en la manera de reglamentar el reciclado de materiales compuestos. La mayoría de los estados en la Unión Europea prohibieron enviar a los basureros los materiales compuestos en 2004, con límites adicionales puestos en la cantidad total que puede incinerarse. Como resultado, muchos fabricantes han sido forzados a asumir la responsabilidad del reciclado de los productos finales.

Mientras el abastecimiento de los materiales compuestos obsoletos excede por mucho la demanda, Europa ha desarrollado un “concepto europeo de reciclaje de compuestos” para financiar la investigación hacia el desarrollo y validar los procedimientos económicamente viables para un reciclado comercial en gran escala de materiales compuestos.

Resumen del capítulo 7

En este capítulo:

- Aprendió cómo clasificar un compuesto como reforzado con fibra, de partículas, laminar o híbrido.
- Comparó y contrastó el rol de la fibra y la matriz en compuestos reforzados con fibras.
- Desarrolló reglas para mezclar que permiten la predicción de propiedades mecánicas de compuestos.
- Se analizaron distintos métodos de fabricación de compuestos reforzados con fibras.
- Se resumieron las propiedades clave involucradas en la selección de fibras reforzantes y materiales matriz.
- Se analizaron los factores que influyen en las propiedades mecánicas de los compuestos de partículas con énfasis especial en el concreto y el asfalto.
- Se consideró la producción de compuestos laminares con énfasis especial en la madera contrachapada.
- Se comentó el lento progreso en desarrollar estrategias comerciales viables para reciclar los materiales compuestos.



Términos clave

Problemas de tarea

1. Un compuesto con cavidades insignificantes y 35% de fracción de fibra será fabricado con una resina de poliéster ($\rho = 1.4$ kg/m^3, $E = 3.5$ GPa) como su matriz. Compare la densidad del compuesto y la fracción de carga tomada por las fibras si se usan fibras de titanio o si se usan fibras Kevlar-49. ¿Qué otros factores podrían influenciar la selección final de las fibras?

2. Explique por qué la resistencia a la tracción del concreto es mucho más baja que su resistencia a la compresión.

3. Calcule la deformación de la matriz en un compuesto cilíndrico de 40 mm^2 que está sujeto a una carga de 30 GPa si la fracción de fibra es de 40%, las cavidades son insignificantes y el módulo elástico de la fibra es de 35 veces el de la matriz.

4. ¿Por qué es importante que la resistencia a la compresión del concreto siempre sea medida después de la misma cantidad de tiempo de curación (28 días)?

5. Calcule el módulo de elasticidad para el concreto con una densidad de 120 lb/pie^3 y una resistencia a la compresión de máximo 28 días de 3 500 lb/p^2.

6. Dos metas importantes en la fabricación de compuestos están mejorando la calidad de los enlaces entre la fibra y la matriz y reduciendo costos. Explique qué tan relevantes resultan las dos metas principales en los compuestos que son mucho más difíciles de reciclar.

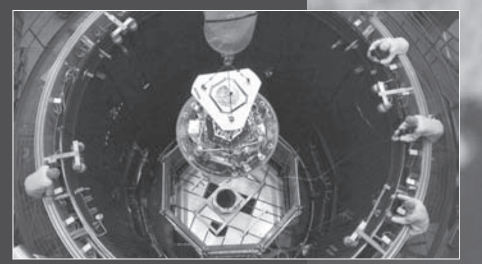
7. Si las propiedades mecánicas del compuesto son reguladas por las propiedades de las fibras reforzantes, ¿por qué un ingeniero paga más por una resina epóxica en vez de utilizar una resina de poliéster menos cara?

8. Explique las ventajas y desventajas de utilizar partículas de agregados más pequeñas en compuestos de partículas.

9. Muchos puentes están hechos de compuestos de concreto reforzados con barras de refuerzo. Clasificar el sistema del compuesto (reforzado con fibra, de partículas, laminar o híbrido) y explicar por qué es una opción tan presente para la construcción.
10. ¿Por qué el concreto de asfalto se utiliza con frecuencia en vez del concreto de cemento Portland en los estacionamientos y caminos?
11. Explique por qué los compuestos sándwich con hojas de cara de aluminio y panales poliméricos de alto desempeño se utilizan en las alas de las aeronaves.
12. Explique por qué los compuestos reforzados con fibras pueden soportar cargas mucho más altas en la dirección longitudinal que en la transversal. ¿Cómo impacta esto en el uso de las esteras tejidas?
13. Describa el impacto de las cavidades en los compuestos en términos de resistencia a la tracción, resistencia a la compresión, densidad, costo y módulo elástico.
14. Explique por qué las ecuaciones 7.2 a 7.11 no aplican a los compuestos con bajo wet out.
15. Una científica ha desarrollado una nueva fibra polimérica que ella cree sería una excelente fibra reforzante en los materiales compuestos. ¿Qué propiedades de la fibra necesitaría usted conocer (y por qué) antes de que pudiera juzgar su potencial como fibra reforzante?
16. ¿Por qué los asfaltos de mezcla fría serían un material atractivo para parchar carreteras pero no para construirlas en primer lugar?
17. $ Explique la función de los cinturones de acero, carbono negro y polímero de poliisobutileno en una llanta comercial de automóvil?
18. ¿Cuáles son las diferencias principales entre la madera contrachapada diseñada para usos interiores y exteriores?
19. ¿Qué distingue una añadidura de un relleno?
20. ¿Cuál es la diferencia entre un compuesto y una aleación?
21. ¿Qué fracción de fibra sería requerida para un compuesto con fibras de titanio en una matriz de policarbonato (E = 2.5 GPa) para lograr que las fibras manejen 85% de una carga de tracción longitudinal? Calcule la densidad y el módulo transversal del compuesto.
22. Si el módulo secante efectivo para una muestra de concreto es de 450 MPa, calcule su tensión de compresión de máximo 28 días.
23. ¿Por qué un contratista se molestaría en preparar un prepreg en vez de hacer de inmediato un compuesto?
24. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de utilizar fibras picadas orientadas aleatoriamente en los compuestos? $
25. Compare el módulo elástico y la densidad de dos compuestos, uno hecho con 40% de fibra de e-glass en una matriz de poliéster (ρ = 1.35 kg/m^3, E = 45 MPa), la otra hecha con 50% de e-glass en el mismo polímero. ¿Por qué no sería beneficioso utilizar 85% de fibra de e-glass?
26. Compare la densidad, el módulo elástico en la dirección longitudinal, el módulo elástico en la dirección transversal y la fracción de carga manejados por las fibras para un compuesto hecho con 35% de fibras de Kevlar-49 en una resina epóxica (ρ = 1.1 kg/m^3, E = 2.5GPa) con uno hecho de una matriz de poliéster (ρ = 1.35 kg/m^3, E = 45 MPa).
27. Comente las posibles alternativas aparte de la incineración o el envío a basureros para:
    - *a)* Concreto
    - *b)* Llantas de automóviles
    - *c)* Fibra de vidrio
    - *d)* Compuestos sándwich de las alas de aviones
28. Explique qué le pasa a las propiedades mecánicas de un compuesto (en las direcciones transversal y longitudinal) si existe mala alineación en las fibras reforzantes.
29. Comente los factores primarios que influyen en la selección de la fibra y la fracción de fibra óptimas para una aplicación de compuesto.
30. ¿Por qué las fibras poliméricas generalmente son una opción pobre para las aplicaciones de alta temperatura?

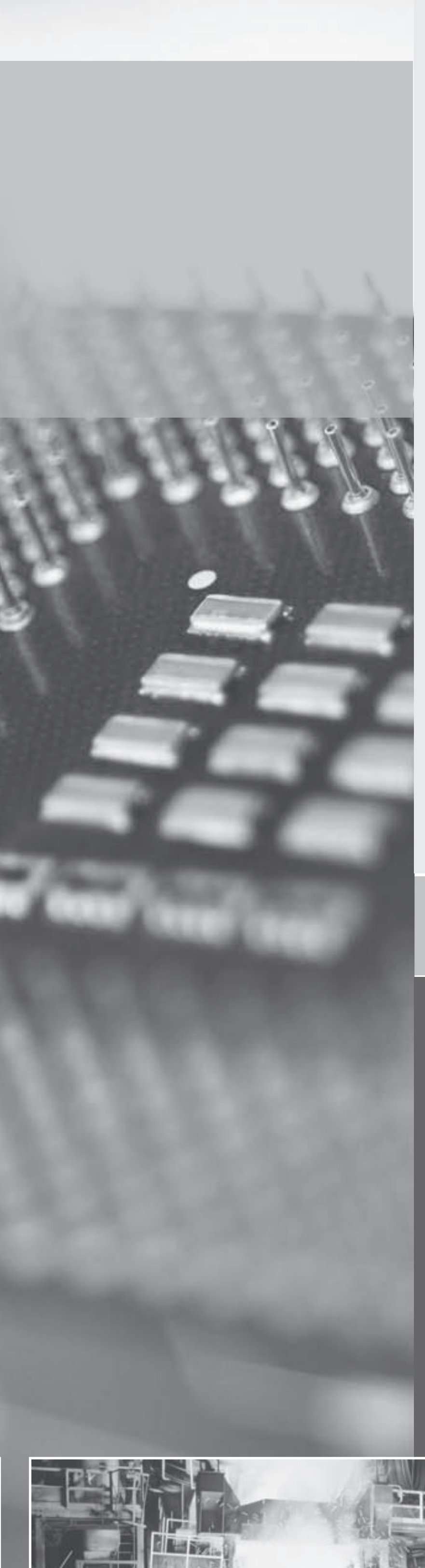
8 Materiales electrónicos y ópticos

GlowImages/ SUPERSTOCK









CONTENIDO

Objetivos de aprendizaje

Al final de este capítulo el estudiante debe se capaz de:

- Explicar las bases físicas y químicas de la conducción en los metales.
- Calcular la movilidad de deriva, la densidad de corriente y la conductividad.
- Comentar los factores que influyen en la resistividad.
- Determinar la resistividad de una aleación.
- Explicar la naturaleza y significado de la brecha de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción.
- Describir la naturaleza de la semiconducción intrínseca y la migración de los electrones y de los agujeros en respuesta a un campo eléctrico aplicado.
- Explicar el rol de los dopantes en los semiconductores extrínsecos tipo p y en los tipo n y la operación de los diodos con base en las uniones p-n.
- Comentar los principios operacionales de los transistores BJT y MOSFET.

- Describir la fabricación de los circuitos integrados.
- Explicar el rol de los materiales dieléctricos en los condensadores.
- Distinguir entre los materiales ferroeléctricos y piezoeléctricos y describir las propiedades únicas asociadas con cada uno.
- Explicar las distinciones entre la luz transmitida, absorbida, reflejada y refractada.
- Calcular los índices de refracción dados para los coeficientes de reflectancia y de transmisión.
- Aplicar la ley de Snell para determinar el ángulo de refracción y el ángulo crítico para la reflexión interna total.
- Explicar los principios operacionales y usos comerciales de las fibras ópticas y los láser.

¿La mayoría del análisis en este texto se ha enfocado en las propiedades mecánicas de los materiales. Sin embargo, algunos materiales tienen importancia comercial debido a cómo conducen la electricidad (materiales electrónicos) o reflejan, absorben o transmiten la luz (materiales ópticos). Aunque los materiales electrónicos y ópticos consisten en las clases estándares ya comentadas (polímeros, metales, cerámicos y compuestos), sus comportamientos únicos garantizan una consideración por separado.

¿Cómo fluyen los electrones a través de los metales?

8.1 CONDUCTIVIDAD EN LOS METALES

| *Aislante* | Material que no tiene electrones libres en cero absoluto.

| *Semiconductores* | Materiales que tienen un rango de conductividad que oscila entre conductores y aislantes.

Debido a la naturaleza disociada del enlace metálico, los metales poseen electrones libres capaces de moverse cuando el material está sujeto a un campo eléctrico en cero absoluto. Cualquier material que no tenga electrones libres en cero absoluto se considera como no metal o ***aislante***. Sin embargo, a temperaturas más altas que el cero absoluto, muchos aislantes desarrollan la capacidad de conducir electrones. A estos materiales se les llama ***semiconductores***, y su desarrollo ha provocado una revolución en las comunicaciones y otras tecnologías que han alterado fundamentalmente la vida de gran parte del mundo desarrollado.

La capacidad de conducir electrones se relaciona directamente con la configuración de capas de electrones alrededor del átomo. Los electrones permanecen en órbita alrededor del núcleo debido a la atracción de Coulomb entre los electrones y los protones en el núcleo. La mecánica cuántica compleja prueba que un electrón debe existir en una nivel de energía discreto, o capa, que satisfaga la ecuación

$$E = \frac{n^2h^2}{8\text{m}\,L^2} \quad (8.1)$$

Tabla 8-1 Subcapas y electrones disponibles para cada número cuántico

Número cuántico	*Electrones máximos*	*Tipos de subcapas*
1	2	1*s*
2	8	1*s*, 3*p*
3	18	1*s*, 3*p*, 5*d*
4	32	1*s*, 3*p*, 5*d*, 7*f*

en donde E es la energía del electrón, n es el ***número cuántico principal*** que representa cada capa, h es la constante de Planck, m es la masa del electrón, y L es una longitud característica asociada con el movimiento ondulatorio. La energía de todos los electrones dentro de la misma capa es igual. Dentro de cada capa, distintos subniveles (s, p, d y f) cuentan para las diferencias en el momento angular y el spin. Al final hay estados cuánticos n^2 para cada capa, con cada estado capaz de sostener un electrón de spin positivo y un electrón de spin negativo, según se requiere por el principio de exclusión de Pauli. La tabla 8-1 resume los diferentes niveles de energía y estados cuánticos.

| ***Número cuántico principal*** |
Capa principal en la que se ubica un electrón.

Mientras los átomos permanezcan aislados de otros átomos, el número de estados permitidos está rígidamente definido. La cuestión se hace más complicada cuando grandes números de átomos entran en proximidad, como en una red sólida de Bravais. Ya que las nubes de electrones son reunidas, los electrones libres de un átomo se pueden mover al orbital de otro átomo. Esta "compartición" de electrones es la base para el enlace metálico, pero aun esta compartición tiene sus limitantes. El principio de exclusión de Pauli impide que los átomos con el mismo spin existan en el mismo subnivel. Como resultado, los niveles de energía se dividen para formar ***bandas de energía***, cada una con niveles de energía levemente diferentes.

| ***Bandas de energía*** |
División de los niveles de energía con varianza leve.

Considere un elemento del Grupo I que tiene un electrón impar sencillo en su capa exterior. Si un número específico de estos átomos del Grupo I (n) entra en contacto entre sí, habría niveles s de n con electrones n libres. Los estados de energía más bajos siempre deben llenarse primero y cada estado s es capaz de sostener dos electrones. Como resultado, las bandas n/2 con los estados de energía más bajos (o estados fundamentales) serán llenados con dos electrones cada uno, mientras que las bandas n/2 con el nivel de energía más alto estarán vacantes. La figura 8-1 muestra la formación y llenado de estas bandas de energía para cuatro átomos que entran en contacto. Las dos bandas de energía más bajas contendrían cada una dos electrones de spin opuesto, mientras que las dos bandas más altas estarían vacantes. El nivel de energía de la banda más alta ocupada se llama ***energía de Fermi*** (E_F).

| ***Energía de Fermi*** |
Nivel de energía de la banda de energía con mayor ocupación.

La clase de separación de bandas mostrada en la figura 8-1 no está limitada a los átomos del Grupo I. Debido a que las propiedades electrónicas de los materiales son regidos por las interacciones de las bandas de electrones ultrape-

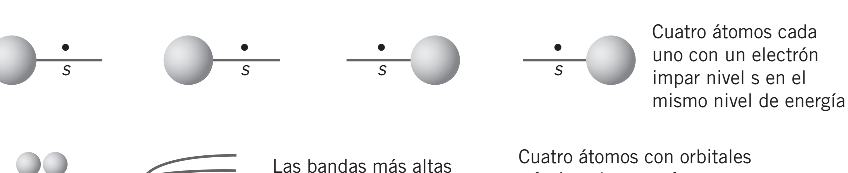


Figura 8-1 Bandas de electrones para los átomos del Grupo I en proximidad

riféricos, y debido a que estas bandas contienen sólo electrones de los mismos niveles correspondientes, todos los metales con un electrón impar sencillo en una capa s formarán bandas como las que se muestran en la figura 8-1. El cobre tiene un electrón en su capa 4*s* que puede interactuar con el electrón 4*s* de otro átomo de cobre. La capa 4*s* puede interactuar sólo con otra capa 4*s*.

La cantidad de separación entre las bandas de electrones varía con el espaciado interatómico, y el número de estados depende del tipo de orbitales presentes en cada átomo. Si átomos n están presentes, cada banda *s* tendrá estados *n*, cada banda *p* tendrá estados 3*n*, mientras que cada banda *d* tendrá estados 8*n*.

Cuando los orbitales s y p están presentes, las bandas de energía frecuentemente se superponen. Por ejemplo, en el aluminio algunas de las bandas 3*p* tienen un estado de energía más bajo que algunas de las bandas 3*s* como se muestra en la figura 8-2. Estas bandas combinadas sp permiten al aluminio tener electrones libres, aun cuando un átomo aislado no tendría electrones impares para compartir.

La velocidad del movimiento del electrón a través de un área de unidad está dado por

$$J = \frac{\Delta q}{A \Delta t}, \tag{8.2}$$

| ***Densidad de corriente*** |
Densidad de la corriente eléctrica.

en donde J es la ***densidad de corriente***, Δq es la carga total pasando a través del área, A es el área y t es el tiempo. Debido a que los electrones están libres para moverse aleatoriamente en cualquier dirección a través de los orbitales compartidos, un campo eléctrico (E) se debe aplicar para inducir un flujo neto de electrones en una dirección específica. Los electrones impares se disocian del núcleo y se vuelven parte de la nube de electrones que rodea al metal y están libres para responder al campo aplicado para generar una densidad de corriente.

Mientras más fuerte sea el campo aplicado, más rápido fluirán los electrones. La velocidad promedio de los electrones se define como la ***velocidad de deriva*** (vd),

| ***Velocidad de deriva*** |
Velocidad promedio de los electrones debido a un campo eléctrico aplicado.

$$v_d = \mu_d E, \tag{8.3}$$

en donde la constante de proporcionalidad μ_d se llama ***movilidad de deriva***.

| ***Movilidad de deriva*** |
Constante de proporcionalidad que relaciona la velocidad de deriva con un campo eléctrico aplicado.

Aunque existe un flujo neto de electrones en la dirección opuesta al campo de electrones, los electrones no fluyen de manera ordenada. Los átomos dentro

Figura 8-2 Bandas de energía para *a*) el cobre y *b*) el aluminio

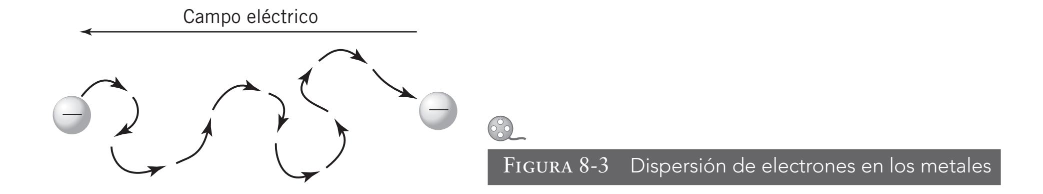


Figura 8-3 Dispersión de electrones en los metales

del metal vibran continuamente, y la red cristalina contiene muchas dislocaciones, sustituciones y otros defectos, así es que los electrones inevitablemente colapsarán con los átomos vibrantes de la red cristalina. Como resultado, viene la dispersión de átomos en la que un electrón se desvía entre los átomos en la red cristalina, muy similar a un pinball rebotando fuera de los topes, como se ilustra en la figura 8-3. Cada rebote individual puede mover al electrón hacia delante o hacia afuera, pero el campo eléctrico causará una migración positiva neta.

La cantidad de tiempo entre las colisiones de dispersión se cuenta mediante la movilidad de deriva, la cual se puede definir como

$$\mu_d = \frac{e\tau}{m_e}, \tag{8.4}$$

en donde *e* es la carga absoluta de un electrón (1.6×10^{-19} *C*), τ es la media de tiempo entre las colisiones de dispersión y me es la masa de un electrón (9.1×10^{-31} kg).

La densidad de corriente (*J*) es directamente proporcional a la velocidad de deriva y se puede expresar como

$$J = env_d, \tag{8.5}$$

en donde e otra vez es la carga absoluta de un electrón y n es el número de electrones por unidad de volumen. Al combinar las ecuaciones 8.3 y 8.5 nos da

$$J = en\mu_d E. \tag{8.6}$$

Entonces, la ***conductividad eléctrica*** (σ) de un metal se puede definir como

| ***Conductividad eléctrica*** | Habilidad de un material para conducir una corriente eléctrica.

$$\sigma = \frac{J}{E}, \tag{8.7}$$

la cual es realmente sólo la forma microscópica de la ley de Ohm. La ley de Ohm es más familiar en su forma macroscópica,

$$\frac{1}{\mathrm{R}} = \frac{\mathrm{I}}{\mathrm{V}}. \tag{8.8}$$

Al combinar las ecuaciones 8.6 y 8.7 proporciona

$$\sigma = en\mu_d. \tag{8.9}$$

La tabla 8-2 resume los valores de conductividad eléctrica para diversos metales comunes y aleaciones de metal.

Tabla 8-1 Valores de conductividad eléctrica para los metales comunes y las aleaciones de metal casi a temperatura ambiente

Material	*Conductividad eléctrica* $(\Omega cm)^{-1}$
Aluminio	3.8×10^5
Acero al carbono	0.6×10^5
Cobre	6.0×10^5
Oro	4.3×10^5
Hierro	1.0×10^5
Plata	6.8×10^5
Acero inoxidable	0.2×10^5

Ejemplo 8-1

Calcule la movilidad de deriva de la plata casi a temperatura ambiente.

SOLUCIÓN

La ecuación 8.8 proporciona que

$$\sigma = en\mu_d \text{ o } \mu_d = \frac{\sigma}{en}.$$

La conductividad eléctrica (σ) se proporciona en la tabla 8-2 y la carga del electrón (e) es una constante, por lo que lo único desconocido es el número de electrones libres por unidad de volumen (n). Debido a que cada átomo de plata tiene un electrón no par para donar a la nube de electrón, n debe ser lo mismo que el número de átomos de plata por unidad de volumen. Por lo tanto, n debe darse por

$$n = \frac{\rho_{Ag} N_A}{M_{Ag}},$$

en donde ρ_{Ag} es la densidad de la plata, N_A es el número de Avogadro y M_{Ag} es el peso molecular de la plata. Por lo tanto,

$$n = \frac{(10.49 \text{ g/cm}^3)(6.02 \times 10^{23} \text{ atomos/mol})}{(107.87 \text{ g/mol})}$$

$$= 5.85 \times 10^{22} \text{ electrones/cm}^3,$$

$$\mu_d = \frac{\sigma}{en} = \frac{6.8 \times 10^5 (\Omega\text{cm})^{-1}}{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(5.85 \times 10^{22} \text{ electrones/cm}^3)}$$

$$= 76.2 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}.$$

8.2 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Si los electrones conductores fueran libres de moverse sin estar comprometidos y sin colisiones, todas las redes cristalinas metálicas estarían libres de resistencia. En vez de esto, las colisiones dentro de la red cristalina crean una barrera para la conductividad. La magnitud de esta barrera se llama ***resistividad eléctrica*** (ρ) y es lo inverso de la conductividad,

$$\rho = \frac{1}{\sigma}. \tag{8.10}$$

| ***Resistividad eléctrica*** |
Barrera a la conducción de electrones provocada por colisiones dentro de la red cristalina.

Cualquier cosa que resulte en más colisiones (y por lo tanto más dispersión) aumenta la resistividad eléctrica y baja la conductividad. Tres factores principales se combinan para impactar la resistividad de un metal: la temperatura, las impurezas y la deformación plástica. La ***regla de Matthiessen*** establece que cada uno de estos factores actúa independientemente del otro y que la resistividad total del material puede definirse como

| ***Regla de Matthiessen*** |
Regla que dicta que la temperatura, las impurezas y la deformación plástica actúan independientemente entre sí al impactar la resistividad de un metal.

$$\rho = \rho_t + \rho_i + \rho_d, \tag{8.11}$$

en donde t, i y d corresponden, respectivamente, a lo térmico, impurezas y deformación.

Cuando la temperatura se incrementa, el número de vacantes en la red cristalina se incrementa, como lo hace la velocidad de la vibración atómica. Como resultado, incrementan la cantidad de dispersión y la resistividad. De la teoría cinética, la relación explícita para la porción térmica de la resistividad se define como

$$\rho_t = \frac{m_e T}{e^2 n a}, \tag{8.12}$$

en donde T es la temperatura y a es una constante de proporcionalidad específica del material. Debido a que la masa de un electrón (m_e), la carga de un electrón (e) y el número de electrones por unidad de volumen (n) son independientes de la temperatura, la ecuación 8.12 se aplica con frecuencia como una simple proporcionalidad relativa a una referencia de temperatura específica,

$$\rho t = \rho_0 + \frac{T}{a}, \tag{8.13}$$

en donde ρ_0 es la resistividad a la temperatura de referencia.

Los átomos de impurezas son más grandes o más pequeños que los átomos de la red cristalina principal, y distorsionan la red cristalina en la región alrededor de la impureza. Esta irregularidad en la estructura incrementa la cantidad de dispersión y, de conformidad, incrementa la resistividad. En el caso de las aleaciones de metal que forman soluciones sólidas de una sola fase, un átomo funciona como una impureza en la red cristalina del otro. Mientras la cantidad de impureza aumenta, el término se puede hacer tan grande que domina la resistividad total, y el rol de la temperatura se vuelve menos importante. Por ejemplo, cuando 20% de cromo se alea con 80% de níquel, la aleación resultante (llamada nicromo) tiene una resistividad 16 veces más alta que el níquel puro. La resistividad eléctrica incrementada no siempre es algo malo; el nicromo tiene extensas aplicaciones comerciales como los cables de calentamiento en hornos, tostadoras y otros electrodomésticos del consumidor.

La resistividad de una aleación binaria se puede calcular con la ***regla de Nordheim***,

| ***Regla de Nordheim*** |
Método para calcular la resistividad de una aleación binaria.

$$\rho_i = CX(1 - X), \tag{8.14}$$

| ***Coeficiente de Nordheim*** |
Constante de proporcionalidad que representa la efectividad de una impureza para incrementar la resistividad.

en donde C es el ***coeficiente de Nordheim***, una constante de proporcionalidad que representa qué tan efectiva es la impureza ante la resistividad creciente, y

TABLA 8-3 Coeficientes de Nordheim para redes cristalinas de cobre

Impureza metálica	*C(nΩ m)*
Oro	5 500
Níquel	1 200
Estaño	2 900
Zinc	300

TABLA 8-4 Coeficientes de Nordheim para redes cristalinas de oro

Impureza metálica	*C(nΩ m)*
Cobre	450
Níquel	790
Estaño	3 360
Zinc	950

X es la concentración de la impureza. La ecuación de Nordheim trabaja bien sólo con soluciones diluidas. Las tablas 8-3 y 8-4 resumen los coeficientes de Nordheim para aleaciones de impurezas metálicas de cobre o redes cristalinas de oro.

La deformación plástica también incrementa la resistividad eléctrica del sistema al distorsionar la red cristalina e incrementar la cantidad de dispersión. Sin embargo, el impacto de la deformación plástica es mucho menor que el incremento de la temperatura o la presencia de impurezas.

¿Qué pasa cuando no hay electrones libres?

8.3 AISLANTES

| ***Agujero*** |
Sitio vacante con carga positiva dejado por un electrón que se mueve a un estado de energía más alto.

| ***Banda de conducción*** |
Banda que contiene electrones conductivos en un estado de energía más alto.

| ***Banda de valencia*** |
Banda que contiene electrones covalentemente enlazados.

| ***Brecha de energía*** |
Brecha entre las bandas de conducción y de valencia.

En la mayoría de los materiales enlazados covalentemente, los estados *s* y *p* están completamente llenos sin dejar electrones libres. Sin estados vacíos disponibles, no hay a dónde se mueva el electrón cuando se expone a un campo eléctrico. El enlace covalente se debe romper para que el electrón sea capaz de moverse. Cuando ocurre dicho rompimiento, el electrón se mueve a un estado de energía mucho más alto y deja detrás un sitio vacante con carga positiva llamado ***agujero***.

A los electrones conductivos en el estado de energía más alto se dice que están en una ***banda de conducción***, mientras que a los electrones enlazados covalentemente se dice que están en una ***banda de valencia***. La diferencia entre los aislantes eléctricos y los semiconductores es el tamaño de la ***brecha de energía*** (E_g) entre las bandas. Como se muestra en la figura 8-4, los aislantes tienen una gran brecha de energía mientras que los semiconductores tienen una brecha mucho más pequeña. Los materiales semiconductores tradicionales, incluyendo el silicio y el germanio, tienen cada brecha lo suficientemente pequeña para que se hagan conductores a temperaturas elevadas. Los materiales con enlace covalente extenso son aislantes excepcionales. Las moléculas de polímeros de cadenas grandes como el poliestireno son de una magnitud tan grande como de 20 órdenes menos conductivas que muchos metales.

8.4 SEMICONDUCCIÓN INTRÍNSECA

Los semiconductores tienen conductividades eléctricas como las de los aislantes y los conductores y poseen brechas de energía lo suficientemente pequeñas para que los electrones puedan ser promovidos de la banda de

valencia a la banda de conducción. Un ***semiconductor intrínseco*** es un cristal perfecto sin defectos, dislocaciones, sustituciones o fronteras de grano que tiene una banda de valencia completamente llena y una banda de conducción completamente vacía separada por una brecha de bandas de menos de 2 eV. El silicio es el semiconductor intrínseco más común. Cuando cuatro átomos de silicio están bastante próximos, sus orbitales se superponen y forman híbridos, cada uno conteniendo dos electrones como se muestra en la figura 8-5. Los orbitales forman un tetraedro para permitirles estar tan separados en el espacio como sea posible. Los átomos adyacentes de silicio forman enlaces covalentes con la banda de valencia completamente llena y la banda de conducción completamente vacía.

| ***Semiconductor intrínseco*** |
Material puro que tiene un rango de conductividad como la de los aislantes y los conductores.

Cuando un campo eléctrico es aplicado a un cristal de silicio, los electrones en la banda de valencia ganan energía y se mueven a la banda de conducción desocupada. Cuando se aplica la suficiente energía al electrón para superar la brecha de energía, el electrón se vuelve libre y deja un agujero detrás. La energía proporcionada también puede ser en forma de un fotón de luz o resultante de la vibración térmica. El electrón libre migra a través del cristal en respuesta al campo. El agujero con carga positiva también migra debido a que los electrones adyacentes hacen un túnel dentro del agujero en la banda de valencia, rellenando ese agujero, pero dejando uno nuevo detrás. Como resultado, hay dos portadores de carga distintos, los electrones de carga negativa y los agujeros de carga positiva. Los electrones migran en la dirección opuesta del campo, mientras que los agujeros migran en la dirección del campo como se muestra en la figura 8-6.

La corriente en el semiconductor se conduce a través del movimiento de los agujeros y los electrones, así es que la densidad de corriente (J) se puede definir por la ecuación 8.15,

$$J = \mathrm{en}V_{d,e} + V_{d,h} \tag{8.15}$$

en donde e es la carga del electrón, n es el número de electrones en la banda de conducción, y $V_{d,e}$ y $V_{d,h}$ son, respectivamente, las movilidades de deriva de los electrones y agujeros.

Como se comentó en la sección 8.2, la cantidad de electrones en la banda de conducción es una fuerte función de temperatura. En casi cero absoluto, todos los electrones estarían en la banda de valencia con la banda de conducción vacía. A medida que la temperatura se incrementa, más electrones son capaces de superar la brecha de energía y entrar a la banda de conducción, dejando

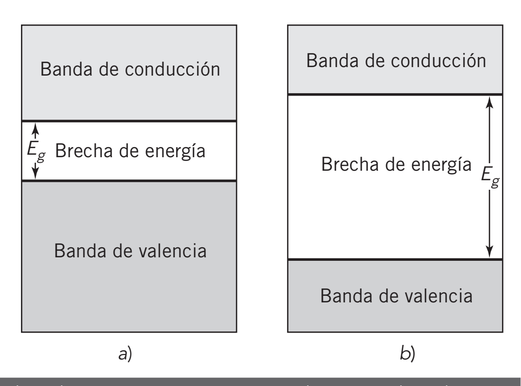


Figura 8-4 Brechas de energía para *a*) semiconductores y *b*) aislantes

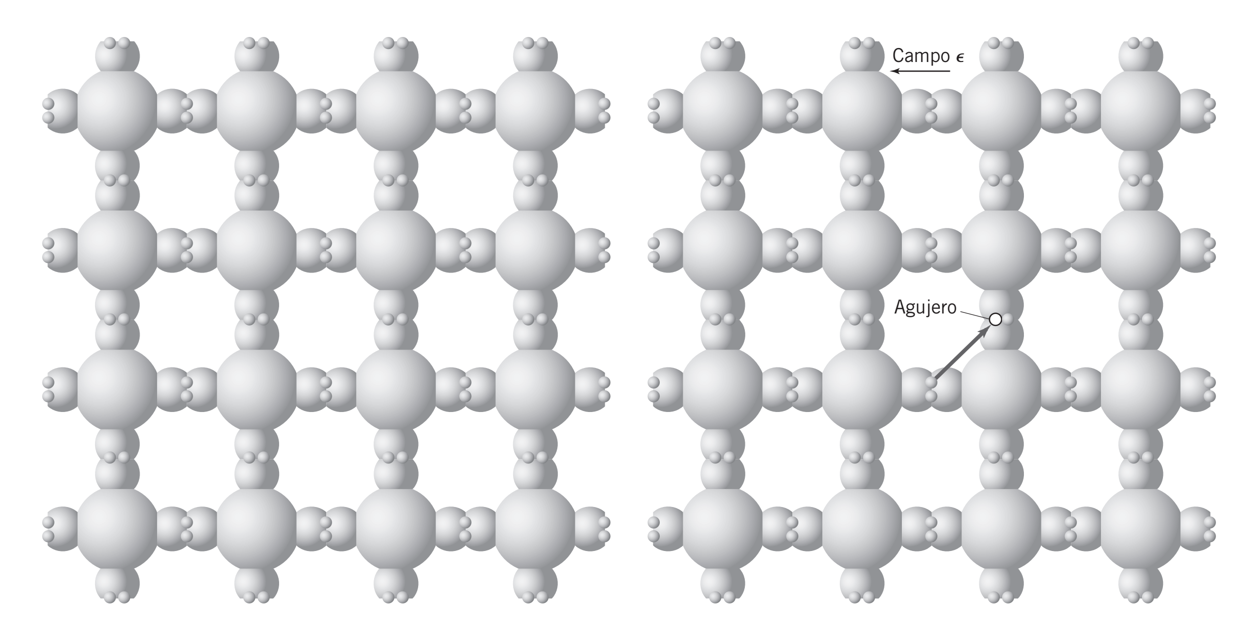


Figura 8-5 Formación orbital híbrida entre átomos de silicio adyacentes

Figura 8-6 Migración de un electrón libre y un agujero

detrás un agujero en la banda de valencia. La dependencia de temperatura de este fenómeno se representa mediante una simple relación de Arrhenius,

$$n = n_0 \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right), \tag{8.16}$$

en donde la constante pre-exponencial n_0 es una función de la constante de Boltzmann, la constante de Planck, la masa de un electrón y la masa efectiva de un agujero.

La dependencia de la conductividad de los semiconductores intrínsecos a la temperatura exponencial esencial limita su aplicabilidad en la microelectrónica. Los pequeños cambios en la temperatura pueden afectar dramáticamente la conductividad del material y, de conformidad, el desempeño del dispositivo. En lugar de esto, las aplicaciones comerciales requieren semiconductores cuya conductividad no es primariamente una función de temperatura.

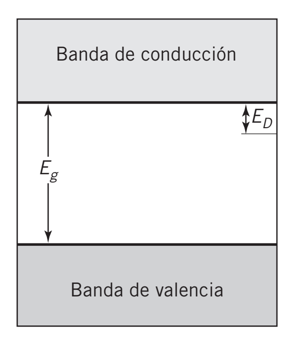
| ***Dopantes*** |
Impurezas añadidas deliberadamente a un material para mejorar la conductividad del material.

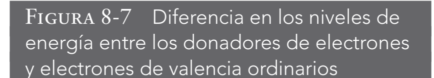
| ***Semiconductor extrínseco*** |
Creado mediante la introducción de impurezas llamadas dopantes dentro de un semiconductor.

8.5 SEMICONDUCCIÓN EXTRÍNSECA

Al introducir impurezas específicas llamadas ***dopantes*** en los semiconductores, se produce un ***semiconductor extrínseco***. La conductividad de un semiconductor extrínseco depende principalmente de la clase y número de dopantes y es casi independiente de la temperatura dentro de rangos de temperatura limitadas. La naturaleza del material dopante impacta grandemente las propiedades del semiconductor.

En un semiconductor intrínseco, el número de electrones (n) promovidos a la banda de conducción siempre es igual al número de agujeros (p) dejados de-




Figura 8-7 Diferencia en los niveles de energía entre los donadores de electrones y electrones de valencia ordinarios

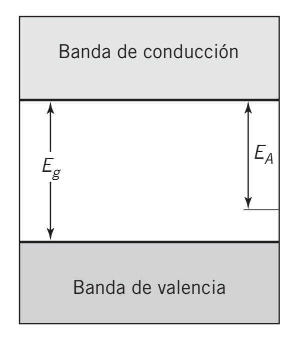


Figura 8-8 Barrera de energía (EA) para un semiconductor tipo p

trás en la banda de valencia, pero esto no es verdad para los semiconductores extrínsecos. Si el átomo dopante dona electrones a la banda de conducción, el número de agujeros en la banda de conducción será menor que el número de electrones en la banda de conducción y el semiconductor se clasifica como ***semiconductor tipo* n**. Similarmente, es posible añadir un dopante que remueva los electrones de la banda de valencia, resultando en más agujeros en la banda de valencia que los electrones en la banda de conducción. Este dopante crea un ***semiconductor tipo* p**.

| *Semiconductor tipo* n | Semiconductor en el que un dopante dona electrones a la banda de conducción, haciendo que el número de agujeros sea menor que el número de electrones en la banda de conducción.

| *Semiconductor tipo* p | Semiconductor en el que un dopante remueve los electrones de la banda de valencia, provocando que haya más agujeros que electrones en la banda de valencia.

La molécula dopante añadida a un semiconductor tipo n funciona como ***donador de electrones*** y típicamente involucra un átomo del Grupo VA (fósforo, arsénico o antimonio) con una valencia de 5. Cuatro de los electrones en tal átomo son participantes activos en el enlace covalente, pero el quinto electrón no tiene nada con qué enlazarse y flota a un nivel de energía justo por debajo de la banda de conducción. La energía requerida para promover ese electrón a la banda de conducción (E_D) es sustancialmente más pequeña que la energía requerida para promover un electrón típico de la banda de valencia (E_g) como se muestra en la figura 8-7.

| *Donador de electrones* | Molécula que dona electrones a otra sustancia.

Este comportamiento tiene impacto significativo en las propiedades del semiconductor. Cuando las temperaturas están demasiado bajas como para proporcionar suficiente energía para superar aun la barrera de energía reducida (E_D) del electrón donante, casi no hay conductividad. Sin embargo, para todo el rango de temperaturas que proporcionan suficiente energía para superar la E_D pero no la suficiente para superar el E_g toda la conductividad del semiconductor está controlada por el número de átomos dopantes (y por lo tanto, electrones donantes) presentes. Esto hace de los semiconductores extrínsecos ideales para las aplicaciones microelectrónicas debido a que las propiedades del material se rigen por una característica controlable (número de átomos dopantes) en vez de una variable externa como la temperatura.

La molécula dopante añadida a un semiconductor tipo p funciona como ***receptor de electrones*** y generalmente involucra un átomo del Grupo IIIA (boro, aluminio, galio o indio) con una valencia de 3. Con sólo tres electrones disponibles, estos dopantes no pueden participar totalmente en el proceso de enlace covalente sin lanzar un electrón desde otro lugar en la banda de valencia, lo cual deja un agujero detrás. Estos sitios de agujeros tienen un nivel de energía ligeramente más alto que el resto de la banda de valencia, así es que una barrera de energía más pequeña (E_A) debe superarse para crear un agujero en la banda de valencia como se muestra en la figura 8-8. Este agujero puede entonces migrar y llevar carga.

| *Receptor de electrones* | Molécula que acepta electrones de otra sustancia.

¿Cómo operan los dispositivos electrónicos?

| *Diodo* |
Interruptor electrónico que permite a los electrones fluir en una sola dirección.

| *Recombinación* |
Proceso en el que los agujeros en un semiconductor tipo *p* y los electrones en un semiconductor tipo *n* se cancelan entre sí.

| *Unión* p-n |
Área en el que las áreas tipo *p* y tipo *n* se encuentran.

| *Zona de depleción* |
Área no conductiva entre la unión *p-n*, en la que se lleva a cabo la recombinación.

| *Polarización* |
Conectar una batería con la terminal positiva correspondiente con un sitio tipo p y la terminal negativa correspondiente con un sitio tipo *n*.

| *Polarización inversa* |
Conectar una batería con la terminal positiva correspondiente con un sitio tipo *n* y la terminal negativa correspondiente con un sitio tipo *p*.

| *Ruptura de Zener* |
Aceleración rápida del portador provocada porque la polarización inversa se hace muy larga, lo cual incita a otros portadores en la región a provocar una corriente grande repentina en la dirección opuesta.

8.6 DIODOS

Los semiconductores tipo *p* y los tipo n son capaces de conducir carga, pero cuando se ponen juntos se usan para formar un ***diodo***, un interruptor electrónico que permite que la corriente fluya en una sola dirección. Considere un semiconductor sencillo que está dopado para ser tipo p de un lado y tipo *n* en el otro, como se muestra en la figura 8-9. El material en el lado tipo *p* conduce carga a través del movimiento de los agujeros mientras que el material en el lado tipo n conduce carga mediante el movimiento de los electrones. En la frontera entre los dos lados, los electrones y los agujeros son inmediatamente atraídos unos con otros. El electrón cae en energía y reocupa el estado electrónico vacío (el agujero). El agujero desaparece y el electrón deja la banda de conducción y regresa a la banda de valencia. Este proceso se llama ***recombinación***. El área en donde se encuentran las regiones tipo p y tipo n se conoce como ***unión* p-n**, y la capa no conductora entre ellas en las que la recombinación sucede se llama ***zona de depleción***.

El comportamiento de la unión *p-n* puede estar influido por la conexión de una batería. Cuando la terminal positiva se conecta al extremo tipo p y la terminal negativa se conecta al extremo tipo n, como se muestra en la figura 8-10, los agujeros en la región tipo *p* y los electrones en la región tipo *n* migran hacia la unión, y la zona de depleción se hace más delgada. A medida que la distancia entre los electrones y los agujeros se reduce, los electrones son capaces de pasar a través de la zona de depleción y crean una corriente importante. Al conectar la batería de esta manera se le llama ***polarización***.

Cuando se utiliza una ***polarización inversa*** (la terminal positiva de la batería se conecta al lado tipo *n* y la terminal negativa al lado tipo *p*), el comportamiento es algo diferente. Esta vez los electrones y agujeros son lanzados de la zona de depleción, como se muestra en la figura 8-11, y casi no ocurre ninguna recombinación. Como resultado, la unión se convierte en un aislante poderoso. Si la polarización inversa se hace muy larga, cualquier portador que logre pasar a través de la zona de depleción es rápidamente acelerado, lo cual incita a los otros portadores en la región y provoca una corriente grande repentina en la dirección opuesta. Este fenómeno se conoce como ***ruptura de Zener***. Algunos diodos están específicamente diseñados para romperse a voltajes específicos para proteger los circuitos electrónicos.

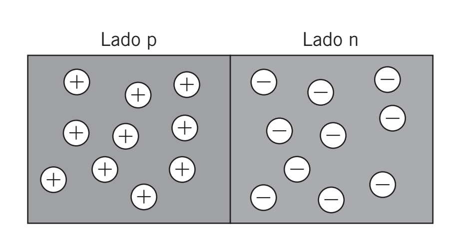


Figura 8-9 Unión *p-n*

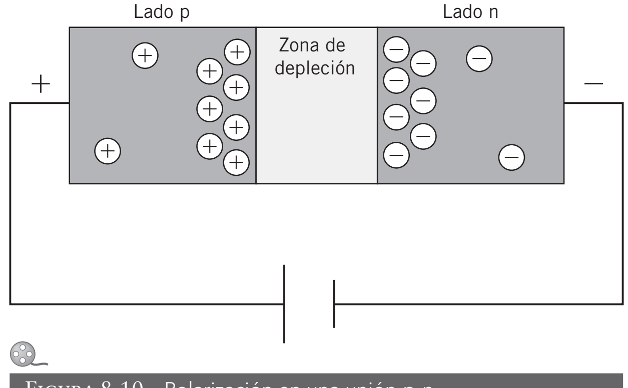


Figura 8-10 Polarización en una unión *p-n*

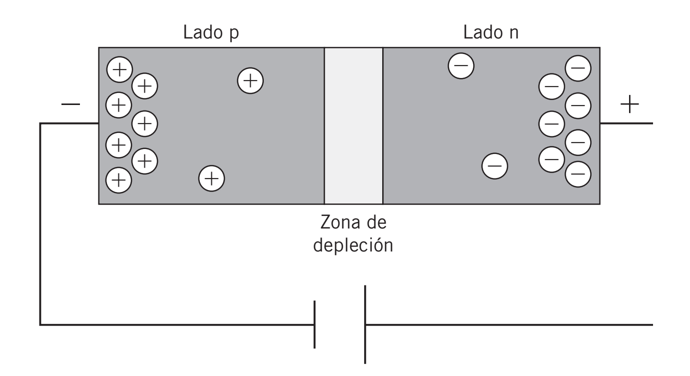


Figura 8-11 Polarización inversa en una unión *p-n*

8.7 TRANSISTORES

Los ***transistores*** sirven como dispositivos de ampliación o de conmutación en la microelectrónica. El ***transistor de unión bipolar (BJT)*** revolucionó la industria de la microelectrónica cuando fue desarrollado en los Laboratorios Bell en 1948. El BJT consiste de tres regiones: emisor, base y colector y viene en dos formas distintas: *p-n-p* y *n-p-n*. En cualquier caso, el transistor es esencialmente un sándwich de tres regiones dopadas. La ***base*** se localiza entre el colector y el transmisor y consiste de un material ligeramente dopado y de alta resistividad. La región del ***colector*** es mucho más grande que el emisor y lo rodea completamente, como se muestra en la figura 8-12, para que todos los electrones (o agujeros en el caso de un transistor *p-n-p*) dados por el emisor sean colectados. Como resultado, un pequeño incremento en el voltaje entre el emisor y la base resulta en un gran incremento en la corriente del colector.

Los transistores de unión casi han sido desplazados en su totalidad en favor de los modernos ***MOSFET*** (transistores con efecto de campo de semiconductores de óxidos de metal, por sus siglas en inglés). Los MOSFET originales utilizan óxidos de metal como el material semiconductor, pero ahora casi todos utilizan silicio o mezclas de silicio y germanio. Los transistores sin óxidos de metal son más apropiadamente llamados ***IGFET*** (transistores con efecto de campo de puerta aislada, por sus siglas en inglés), pero los términos IGSET y MOSFET indistintamente se usan.

Los MOSFET se producen como tipo *p* o tipo *n*, pero los principios operacionales son similares para cada uno. En un MOSFET tipo p dos pequeñas regiones de material semiconductor tipo *p* se depositan en una gran región de material tipo *n*. Estas pequeñas regiones se conectan mediante un canal estrecho tipo *p*, como se muestra en la figura 8-13. Las conexiones de metal se unen a cada región, luego se deposita una delgada capa de dióxido de silicio en la parte superior del material tipo *p* para servir como aislante. Una región de material tipo *p* servirá como *fuente* mientras que la otra se vuelve un *desagüe*. Un conector de metal adicional, llamado *compuerta*, se adjunta a la capa aislante entre la fuente y el desagüe.

| *Transistores* |
Dispositivos que sirven como dispositivos de ampliación o de conmutación en la microelectrónica.

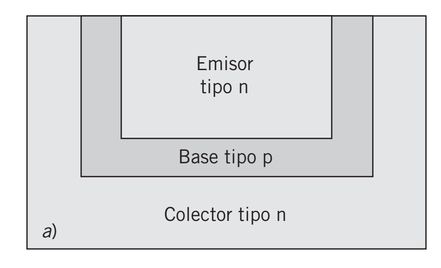
| *Transistor de unión bipolar (BJT)* |
Dispositivo electrónico prototípico desarrollado en 1948 utilizado para amplificar señales.

| *Base* |
Pieza central de un transistor BJT hecha de material ligeramente dopado y con alta resistividad.

| *Colector* |
La región más grande en un transistor BJT que rodea al emisor y evita el escape de todos los electrones o agujeros.

| *MOSFET* |
Transistor hecho originalmente con óxidos de metal, pero el término es ahora intercambiable con IGFET.

| *IGFET* |
Transistor hecho sin el uso de óxidos de metal, pero el término es ahora intercambiable con MOSFET.



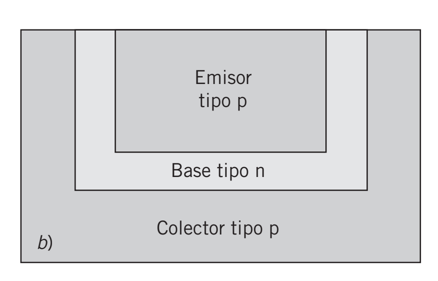


Figura 8-12 Esquema de transistores *a) n-p-n* y *b) p-n-p*

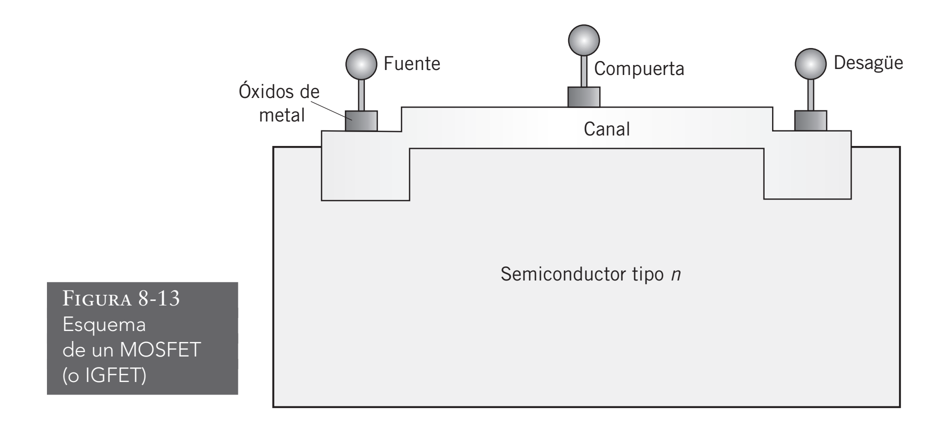


Figura 8-13 Esquema de un MOSFET (o IGFET)

| ***Circuitos integrados*** | Muchos transistores integrados en un solo microchip.

| ***Circuitos análogos*** | Tipo de circuitos integrados que desarrollan funciones como amplificación, demodulación y filtración.

| ***Circuitos digitales*** | Tipo de circuitos integrados capaces de desempeñar funciones como flip-flops, compuertas lógicas y otras operaciones más complejas.

| ***Señal mixta*** | Tipo de circuitos integrados con circuitos análogo y digital en el mismo chip.

| ***Fotoresist*** | Cubierta que se vuelve soluble cuando es expuesta a la luz ultravioleta.

| ***DNQ-Novolac*** | Mezcla de polímero fotorresistente sensible a la luz.

| ***Horneo suave*** | Proceso para remover solventes de residuo de la fotorresistencia.

| ***Máscara*** | Placa de vidrio transparente usada en el proceso de fotorresistencia.

| ***Desarrollador*** | Solución alcalina que remueve material expuesto cuando se aplica a un microchip.

| ***Proyección litográfica*** | Proceso de proyectar luz ultravioleta en un microchip en una manera similar a un proyector de diapositivas.

Cuando un campo eléctrico se aplica a la compuerta, la conductividad en el canal es directamente impactada. Las pequeñas alteraciones en el campo aplicado resultan en una diferencia sustancial en la corriente. La operación de los MOSFET es algo similar a los BJT, pero se requieren corrientes de compuerta mucho más grandes, y los MOSFET no están sujetos a la ruptura.

8.8 CIRCUITOS INTEGRADOS

A mediados del siglo xx, las empresas eran capaces de integrar muchos transistores en un solo microchip. Para 2006, un solo chip podía ser reimpreso con un millón de transistores por milímetro cuadrado. Los ***circuitos integrados*** se clasifican aproximadamente en tres categorías: ***circuitos análogos***, ***circuitos digitales*** y ***señal mixta***, la cual contiene circuitos análogos y digitales en el mismo chip. Los circuitos análogos desempeñan funciones de amplificación, demodulación y filtración; los circuitos integrados digitales incluyen flip-flops, compuertas lógicas y otras operaciones más complejas.

Los circuitos integrados se fabrican a partir de sencillos cristales grandes de silicio extremadamente puro cortados en obleas delgadas. Después de que la oblea se limpia muy bien, una delgada capa de SiO_2 se deposita en la superficie seguida de un *fotoresist*. El fotoresist es un polímero o mezcla de polímero sensible a la luz como el *DNQ-Novolac* (diazonaftoquinona y resina de novolac). Los residuos de solventes se remueven del fotoresist a través de un proceso llamado *horneo suave*, entonces una placa de vidrio transparente, o *máscara*, se coloca sobre la oblea, y una emulsión de película de metal forma un patrón en un lado del vidrio. Cuando la luz ultravioleta es enviada a través de la máscara, la capa del fotoresist se disuelve, dejando expuesta la oblea. Entonces la oblea completa se expone a una solución alcalina llamada *desarrollador*, el cual remueve el material expuesto, como se muestra en la figura 8-14. A través de este método, los patrones de circuitos complejos se construyen capa por capa.

Cuando este método fue desarrollado, la máscara se aplicaba directamente a la oblea de silicio, pero este proceso dejaba un daño microscópico que se hacía más significativo mientras el circuito se hacía más compacto. Hoy en día, la *proyección litográfica*, en la que la luz ultravioleta se proyecta hacia la oblea de forma muy parecida a un proyector de diapositivas, se ha vuelto mucho más común.

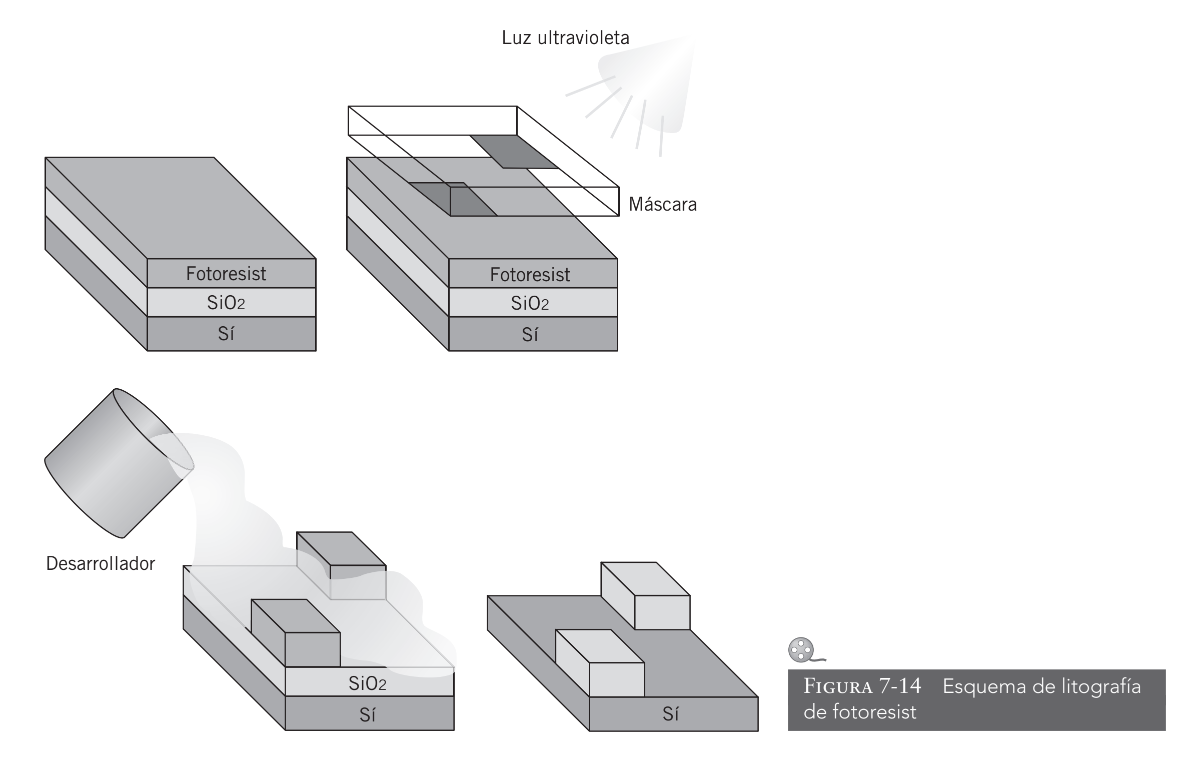


Figura 7-14 Esquema de litografía de fotoresist



La densidad de los transistores en circuitos integrados se expande rápidamente, haciendo a los dispositivos electrónicos más pequeños, más rápidos y menos caros. Gordon Moore, cofundador del gigante fabricante de chips Intel, observó desde 1965 que la densidad de los transistores se duplica cada 18 a 24 meses. Esta observación empírica se ha conocido como la ***ley de Moore*** y se ha vuelto un objetivo para toda la industria de microelectrónica.

| ***Ley de Moore*** |
Observación empírica acerca de que la densidad de los transistores se duplica cada 18 a 24 meses.

8.9 COMPORTAMIENTO DIELÉCTRICO Y CONDENSADORES

Cuando dos placas paralelas están conectadas a una batería, las placas se cargan y se desarrolla un campo eléctrico que corre de la placa positiva a la placa negativa, como se muestra en la figura 8-15. Cuando estas placas cargadas se utilizan como parte de un circuito eléctrico, se les llama ***condensadores*** y principalmente sirven como medios para almacenar energía. La capacidad (C) de las placas paralelas se define como

| ***Condensadores*** |
Dos placas cargadas separadas por un material dieléctrico.



$$C = \frac{Q}{A}, \qquad (8.17)$$

en donde Q es la carga en las placas (típicamente en Coulombos) y A es el área transversal de una placa.

| ***Dieléctrico*** |
Material colocado entre las placas de un condensador para reducir la resistencia del campo eléctrico sin reducir el voltaje.

Si sólo el aire separara a las placas paralelas, entonces resultaría que un campo eléctrico haría chispas entre las placas. Para evitar que esto suceda, un material ***dieléctrico*** se coloca entre las dos placas para reducir la tensión del campo eléctrico sin bajar el voltaje. El dieléctrico es un material polarizado que se opone al campo eléctrico entre las placas, como se muestra en la figura 8-16. La capacidad del material dieléctrico para oponerse al campo se da por una ***constante dieléctrica*** (K) sin dimensión, que es una función de composición,

| ***Constante dieléctrica*** |
Valor sin dimensión que representa la habilidad de un material eléctrico para oponerse a un campo eléctrico.

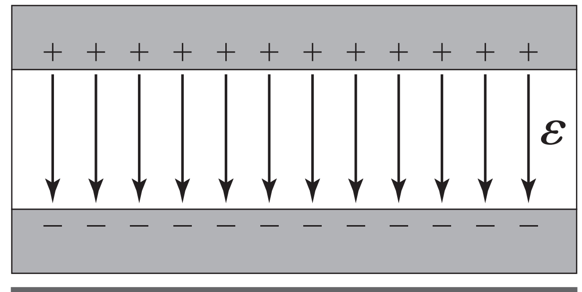


Figura 8-15 Condensador de placas paralelas

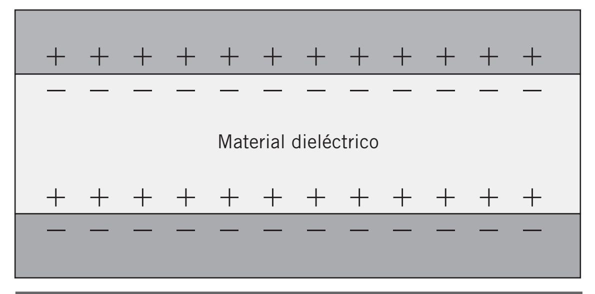


Figura 8-16 Rol de un material dieléctrico en un condensador

microestructura, temperatura y frecuencia eléctrica. Los valores de K para materiales dieléctricos comunes se resumen en la tabla 8-5. La capacidad de los condensadores que contiene dieléctricos se da mediante

$$C = \frac{K\epsilon_0 A}{d}, \tag{8.18}$$

en donde ϵ_0 es la *permitividad* de un vacío (8.85×10^{-12} F/m) y d es la distancia entre las placas. En general, las placas paralelas son de níquel o una aleación de plata-paladio.

Tabla 8-5 Constante dieléctrica de materiales comunes

Material	*K (a 60 Hz)*	*K (a 1000 000 Hz)*
Alúmina	9.0	6.5
Titanato de bario ($BaTiO_3$)	n/d	2 000-5 000
Nylon	4.0	3.6
Polietileno	2.3	2.3
Poliestireno	2.5	2.5
Cloruro de polivinilo	3.5	3.2
Caucho	4.0	3.2
Vidrio de sosa-cal	7.0	7.0

¿Qué otros comportamientos eléctricos despliegan algunos materiales?

8.10 MATERIALES FERROELÉCTRICOS Y PIEZOELÉCTRICOS

| ***Materiales ferroeléctricos*** | Materiales con dipolos permanentes que se polarizan espontáneamente sin la aplicación de un campo eléctrico.

La mayoría de los materiales electrónicos comentados en este capítulo requieren la aplicación de un campo eléctrico para que sus propiedades electrónicas se hagan evidentes. Los ***materiales ferroeléctricos***, sin embargo, tienen dipolos permanentes que los hacen polarizarse espontáneamente aun sin un campo eléctrico aplicado. La polarización se puede invertir si un campo eléctrico se aplica al material y se detendrá si la temperatura se eleva más allá de un límite crítico llamado *temperatura Curie* (T_c). Los materiales

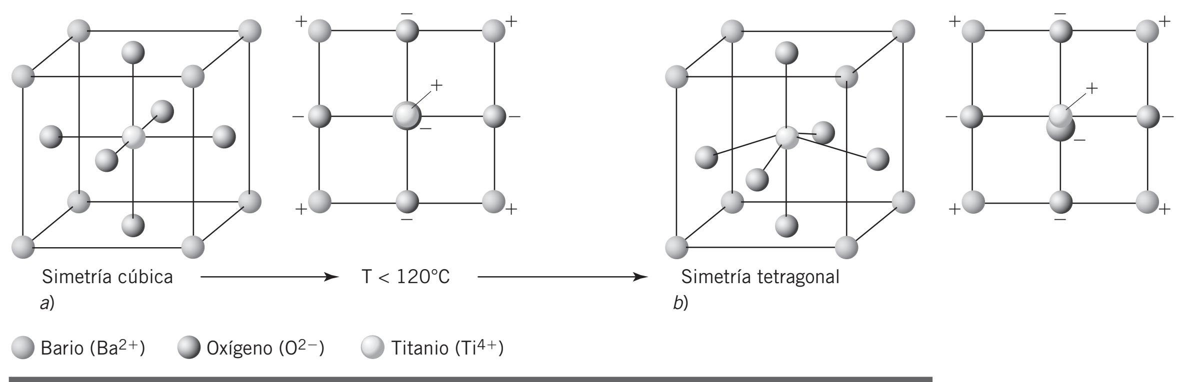


Figura 8-17 Estructura del titanato de bario a) por arriba y b) por abajo de la temperatura Curie

ferroeléctricos se utilizan en sistemas de acceso de memoria aleatorio (DRAM) y sensores infrarrojos. Los materiales ferroeléctricos comunes incluyen el titanato de bario ($BaTiO_3$) y el titanato de plomo y zirconio (PZT).

La naturaleza ferroeléctrica de estos materiales surge de la estructura asimétrica de las celdas unitarias. Por arriba de la ***temperatura Curie*** (120ºC), el titanato de bario existe como un sistema cúbico centrado (FCC) con un ión de titanio (Ti^{4+}) establecido en el centro, con oxígeno (O^{2-}) en las caras y el bario (Ba^{2+}) en las esquinas como se muestra en la figura 8-17. La estructura es simétrica e incapaz de ser ferroeléctrica. Cuando la temperatura del material cae a menos de los 120ºC, la celda unitaria cambia a cúbica simple, resultando en cambio de red de la posición relativa de los iones. Las cargas positivas se acumulan cerca de la parte superior de la celda unitaria, con cargas negativas juntándose cerca del fondo.

Los ***materiales piezoeléctricos*** convierten la energía mecánica a energía eléctrica o la energía eléctrica a energía mecánica y son ampliamente usados en los ***transductores*** que convierten las ondas de sonido en campos eléctricos. La producción de un campo eléctrico en respuesta a una fuerza mecánica se llama ***efecto piezoeléctrico***. El cambio en el grosor de un material en respuesta a un campo eléctrico aplicado se llama ***efecto piezoeléctrico converso***.

Al igual que los materiales ferromagnéticos, los piezoeléctricos se polarizan, pero sus cargas positivas y negativas se distribuyen simétricamente. Cuando una tensión mecánica se aplica, la estructura de cristal se deforma ligeramente y provoca una diferencia potencial para formar a través del material. El efecto converso, en el que la estructura del cristal se deforma en respuesta a un campo eléctrico aplicado, fue postulado a partir de la termodinámica y probado por Marie Curie, científica francesa de principios del siglo xx quien permanece como la única persona en haber ganado el premio Nobel en dos ramas diferentes de la ciencia: física en 1903 y química en 1911.

| ***Temperatura Curie*** |
Temperatura por arriba de la cual un material ya no despliega propiedades ferromagnéticas.

| ***Materiales piezoeléctricos*** |
Materiales que convierten la energía mecánica energía eléctrica y viceversa.

| ***Transductores*** |
Dispositivos que convierten las ondas de sonido en campos eléctricos.

| ***Efecto piezoeléctrico*** |
Producción de un campo eléctrico en respuesta a una fuerza mecánica.

| ***Efecto piezoeléctrico converso*** |
Cambio en el grosor de un material en respuesta a un campo eléctrico aplicado.

¿Qué son las propiedades ópticas y por qué importan?

8.11 PROPIEDADES ÓPTICAS

Los materiales ópticos son especiales debido a las formas en que reflejan, transmiten o refractan la luz. La luz visible es solo una pequeña sección de todo el espectro electromagnético mostrado en la figura 8-18. Los

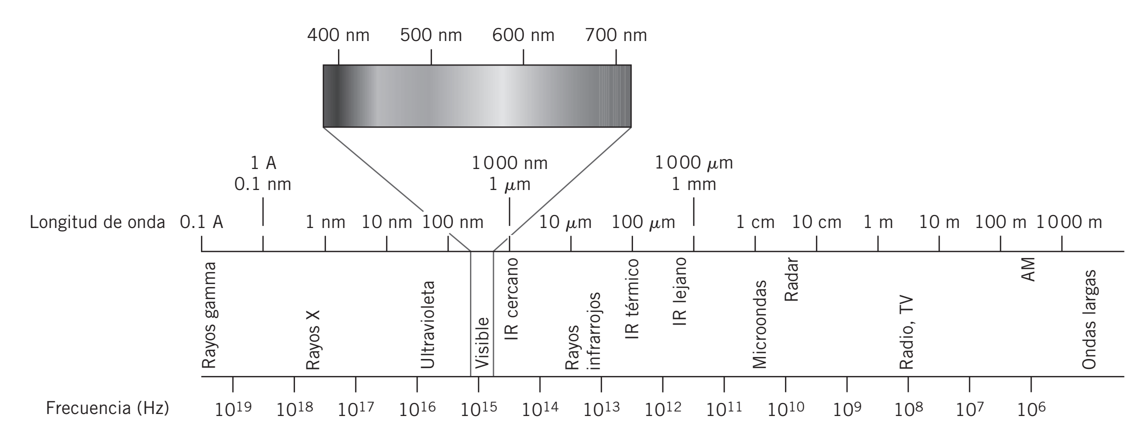


Figura 8-18 Espectro electromagnético

rayos gamma, los rayos X (comentados en el capítulo 2), las microondas, las ondas de radio, los rayos infrarrojos y la radiación ultravioleta varían en frecuencia y longitud de onda pero viajan a la misma velocidad (3×10^8 m/s en un vacío). La radiación electromagnética despliega propiedades de partículas y de ondas, y la velocidad de la radiación se define como el producto de la longitud de onda por la frecuencia como se muestra en la ecuación 8.19:

$$c = \lambda \nu. \tag{8.19}$$

| *Fotones* |
Unidades discretas de luz.

Toda la radiación electromagnética viaja en unidades discretas llamadas ***fotones***, regidos por la ecuación fundamental

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \tag{8.20}$$

en donde E es la energía del fotón y h es la constante de Planck (6.62×10^{-34} $J \cdot s$). Como consecuencia, el fotón se puede considerar simultáneamente como una partícula con energía (E) o una onda con una frecuencia y longitud de onda establecida.

| *Ecuación de Fresnel* |
Relación matemática que describe la cantidad de luz reflejada en la interfase de dos medios distintos.

| *Coeficiente de reflexión* |
Fracción de luz reflejada en la interfase de dos medios.

| *Coeficiente de transmisión* |
Fracción de luz no reflejada en la interfase de dos medios y en su lugar entra al segundo medio.

| *Índice de refracción* |
Término específico de material que representa el cambio en la velocidad relativa de la luz mientras pasa a través de un medio específico.

Cuando un fotón de energía electromagnética interactúa con cualquier material, resultan cuatro posibles fenómenos como se muestra en la tabla 8-6.

Alguna fracción de la intensidad de un rayo de luz incidental se refleja cuando alcanza una superficie mientras el balance pasa a través de ésta. El físico francés Augustin-Jean Fresnel desarrolló una ecuación para cuantificar la fracción de luz reflejada. La ***ecuación de Fresnel*** establece que para una luz con un ángulo de incidencia cercano a cero,

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2, \tag{8.21}$$

en donde R es el ***coeficiente de reflexión*** y n es el índice de refracción de los dos medios. El ***coeficiente de transmisión*** (T) es apenas $1 - R$.

El ***índice de refracción*** (n) representa el cambio en la velocidad relativa de la luz mientras pasa a través de un nuevo medio. La luz viajando a través de un vacío tiene un índice de refracción de 1. La mayoría de los materiales tienen índices de refracción que son mayores a 1; la mayoría de los vidrios y los polímeros tienen valores en un rango de 1.5 a 1.7. El matemático holandés

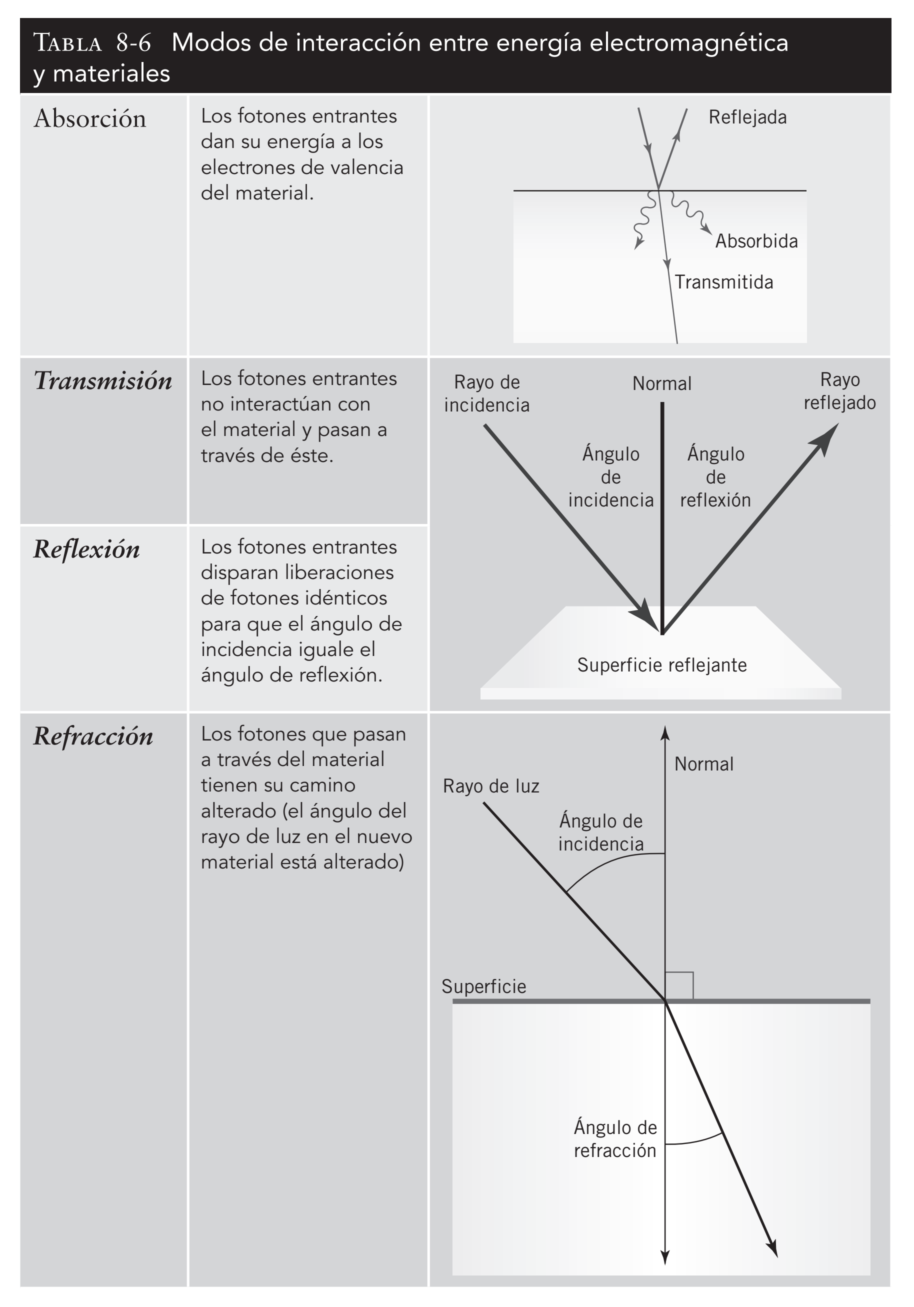


Tabla 8-6 Modos de interacción entre energía electromagnética y materiales

Absorción	Los fotones entrantes dan su energía a los electrones de valencia del material.	
Transmisión	Los fotones entrantes no interactúan con el material y pasan a través de éste.	
Reflexión	Los fotones entrantes disparan liberaciones de fotones idénticos para que el ángulo de incidencia iguale el ángulo de reflexión.	
Refracción	Los fotones que pasan a través del material tienen su camino alterado (el ángulo del rayo de luz en el nuevo material está alterado)	

| *Transmisión* | Proceso en el que los fotones entrantes pasan a través de un material sin interactuar.

| *Reflexión* | Proceso en el que los fotones entrantes disparan liberaciones de fotones idénticos de tal manera que el ángulo de incidencia iguala al ángulo de reflexión.

| *Refracción* | Proceso en el que los fotones entrantes tienen su camino alterado en el nuevo medio.

Willebrord Snellius probó que el cambio en la velocidad de las ondas electromagnéticas podría estar directamente relacionado con el ángulo de refracción. La ***ley de Snell*** dice que

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{sen } \theta_2}{\text{sen } \theta_1}. \tag{8.22}$$

| *Ley de Snell* | Ecuación que describe el cambio en la velocidad de las ondas electromagnéticas que pasan entre dos medios.

Por lo tanto, la fracción de luz reflejada y el ángulo de la luz refractada se pueden predecir al conocer sólo el ángulo de incidencia y los índices de refracción de los dos materiales.

Ejemplo 8-2

Determine el coeficiente de reflexión, coeficiente de transmisión y ángulo de refracción para un rayo de luz visible pasando del aire ($n = 1$) hacia una delgada capa de vidrio de sosa de cal ($n = 1.52$) con un ángulo de incidencia de 10 grados.

SOLUCIÓN

El coeficiente de reflexión (R) se calcula a partir de la ecuación de Fresnel (ecuación 8.21),

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 = \left(\frac{1.52 - 1}{1.52 + 1}\right)^2 = 0.043,$$

por lo que 4.3% de la luz se refleja en la superficie del vidrio de sosa de cal. De conformidad, el coeficiente de transmisión (T) se da mediante

$$T = 1 - R = 0.957,$$

y 95.7% de la luz pasa hacia el vidrio.

El ángulo de refracción se determina mediante la ley de Snell (ecuación 8.23), por lo que

$$\text{Sen}\ \theta_2 = \frac{n_1 \text{ sen } \theta_1}{n_2} = \frac{(1)(\text{sen } 10)}{1.52} = 0.114, \text{ y}$$

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1}(0.114) = 6.55°.$$

En la mayoría de los casos, el rayo refractado pasa hacia el nuevo material, pero en ciertos casos cuando el rayo está viajando en un material con un mayor índice de refracción y viene a uno con un menor índice de refracción, la reflexión interna total sucederá. Como lo ilustra la figura 8-19, cuando el rayo incidente está más cerca de ser paralelo a la frontera entre los dos materiales, el rayo refractado puede no ser capaz de cruzar la frontera. La ley de Snell se puede usar para determinar un ***ángulo crítico de incidencia*** (θ_c) por arriba del cual la reflexión interna total sucede,

| *Ángulo crítico de incidencia* |
Ángulo más allá del cual un rayo no puede pasar hacia un material adyacente con un índice de refracción diferente y en su lugar es totalmente reflejado.

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right). \tag{8.23}$$

La apariencia de un material es impactada significativamente por sus reflexiones. Una refracción de alto índice ($n > 2$) resulta en la oportunidad para reflexiones internas múltiples de la luz. Los diamantes y vidrios de plomo brillan por estas múltiples reflexiones. Los materiales con superficies altamente lustradas y suaves reflejan la luz con muy pequeña variación en el ángulo de reflexión. Esto se llama ***reflexión especular***. Los materiales más ásperos tienen variaciones locales significativas en los ángulos de superficies, y la ***reflexión difusa*** resultante lleva a un rango más amplio de ángulos de reflectancia, muy similar a cómo los cristales imperfectos en un material llevan a la propagación en los picos de difracción de los rayos X, como se comenta a detalle en el capítulo 2.

| *Reflexión especular* |
Reflexión de servicios sin problemas con una pequeña variación en el ángulo de reflexión.

| *Reflexión difusa* |
Amplio rango de ángulos de reflectancia que resultan de las ondas electromagnéticas que golpean objetos en bruto con una variedad de ángulos de superficie.

Los materiales ópticos se clasifican con base en su tendencia para transmitir la luz. Los materiales transparentes permiten que atraviese la suficiente luz como para que se vea una imagen clara. Los materiales opacos no permiten

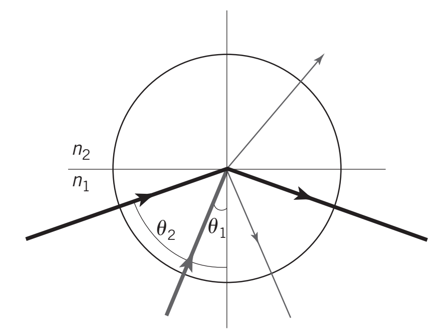


Figura 8-19 Reflexión interna total

que atraviese la suficiente luz como para que se vea una imagen. Los materiales translúcidos empalman casi todo el espectro entre transparente y opaco, permitiendo que se vea solo una imagen difusa. Los vidrios escarchados o las jarras de leche son translúcidas. La translucidez resulta de la dispersión de la luz, ya sea debido a las superficies ásperas, o por los poros u otras impurezas presentes en el material.

El color de un material se basa en la absorción selectiva de longitudes de ondas de luz específicas. Un objeto tendrá el color de la luz que se refleja de éste. Cuando un material refleja el espectro visible total igualmente, parece ser blanco. Cuando absorbe el espectro total, parece ser negro. La adición de agentes colorantes a los vidrios (comentada en el capítulo 6) está diseñada para cambiar qué colores son absorbidos para alterar la apariencia del vidrio.

8.12 APLICACIONES DE LOS MATERIALES ÓPTICOS

Las propiedades ópticas de los materiales encuentran usos especiales en un número de aplicaciones comerciales importantes. Aquí se consideran dos específicos, las *fibras ópticas* y los *láser*.

Las ***fibras ópticas*** son vidrios delgados o fibras poliméricas usadas para transmitir ondas de luz a través de la distancia y son especialmente importantes en la industria de la comunicación. Hasta finales de los años setenta, la mayoría de las señales de comunicación eran transportadas como señales eléctricas a través de alambre de cobre. Sin embargo, las fibras ópticas ofrecen ventajas importantes, incluyendo la no interferencia entre fibras adyacentes, pérdida más baja, y algo mucho más importante, una mucho mayor capacidad de transportación de datos. Una fibra óptica sencilla puede proporcionar la capacidad de transportación de datos de miles de enlaces eléctricos.

| ***Fibras ópticas*** |
Vidrio delgado o fibras poliméricas utilizados para transmitir ondas de luz a través de distancias.

Las fibras ópticas son materiales fotónicos que transmiten señales mediante fotones en lugar de electrones. La mayoría de las fibras ópticas comerciales involucran un vidrio básico delgado rodeado por un revestimiento hecho de un material que tiene un índice más bajo de refracción. El revestimiento es envuelto en una capa exterior polimérica protectora. Como se comentó previamente, una reflexión total del rayo sucederá cuando la luz pasa a través de un material con un mayor índice de refracción. La reflexión total permite que la señal fotónica se propague a través de grandes longitudes de fibra. Mientras el ángulo de incidencia sea más grande que el ángulo crítico, la reflexión interna total provocará que la señal óptica se propague a través de la longitud del núcleo como se muestra en la figura 8-20.

A medida que el fotón viaja por el cable, algo de la resistencia de la señal se pierde debido a la absorción o dispersión de fotones. A este proceso se le llama ***atenuación***. La señal óptica debe mejorarse periódicamente para superar

| ***Atenuación*** |
Pérdida de resistencia durante la transmisión de una señal óptica resultante de la absorción o dispersión de fotones.

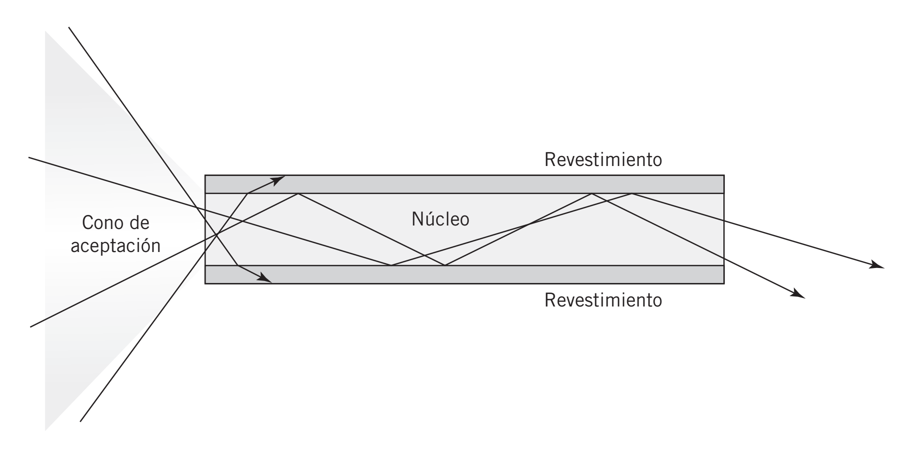


Figura 8-20 Propagación de una señal óptica mediante reflexión interna total

la atenuación. Los primeros sistemas de fibra óptica requerían de repetidores, dispositivos que convertían las señales ópticas en señales eléctricas, y las mejoraban, luego las convertían de vuelta a señales ópticas. Sin embargo, los sistemas modernos utilizan amplificadores ópticos (esencialmente láser) para mejorar las señales ópticas sin convertirlas en señales eléctricas.

| *TOSLINK* | Conector común para cables ópticos.

En adición a la transmisión de señales ópticas a través de grandes distancias, los cables de fibra óptica se utilizan en las aplicaciones diarias como conectar el equipo de audio. El conector más común, ***TOSLINK***, fue creado por Toshiba y ha encontrado una amplia aceptación como conector primario para los reproductores de discos compactos. Un conector TOSLINK se muestra en la figura 8-21.

Las fibras ópticas tienen aplicaciones más allá de la industria de las comunicaciones. Los endoscopios médicos utilizados en los sistemas para captar las imágenes del cuerpo interno utilizan fibras ópticas como un sistema de entrega de luz. Cuando se utilizan las señales de luz de color, las fibras ópticas a veces sirven para propósitos puramente decorativos, como la lámpara que se muestra en la figura 8-22.



Figura 8-21 Conector TOSLINK

Cortesía de James Newell

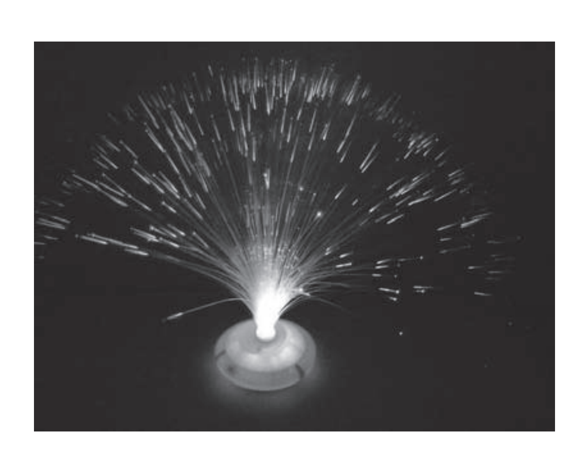


Figura 8-22 Dispositivo decorativo que utiliza fibras ópticas

Cortesía de James Newell

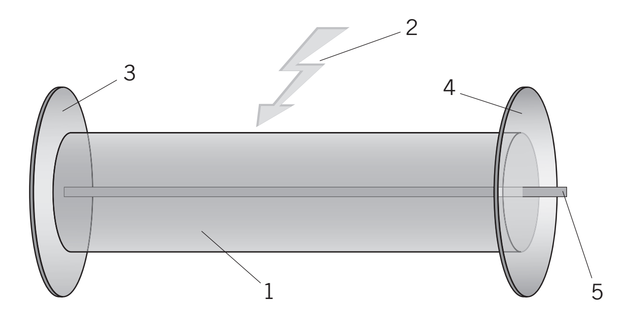


Figura 8-23 Esquema de un láser: 1) medio de ganancia, 2) fuente de poder externa utilizada para incitar al medio de ganancia, 3) y 4) cavidad óptica y 5) rayo láser

Generalmente, la luz transmitida a través de una fibra óptica se produce por un láser. La palabra ***láser*** es un acrónimo para "amplificación de luz mediante emisión de radiación estimulada". Aunque los láser han existido desde 1960, mucha gente aun se imagina una pistola de rayos cuando escuchan el término. En la práctica, los láser han encontrado mucho mejor uso en los lectores de códigos de barras y reproductores de DVD, en donde sus propiedades los capacitan para leer las imágenes ópticas en la superficie del código de barras o DVD.

| *Láser* |
Dispositivo que produce luz a partir de una sola longitud de onda en un rayo bien definido. Acrónimo de "amplificación de luz mediante emisión de radiación estimulada".

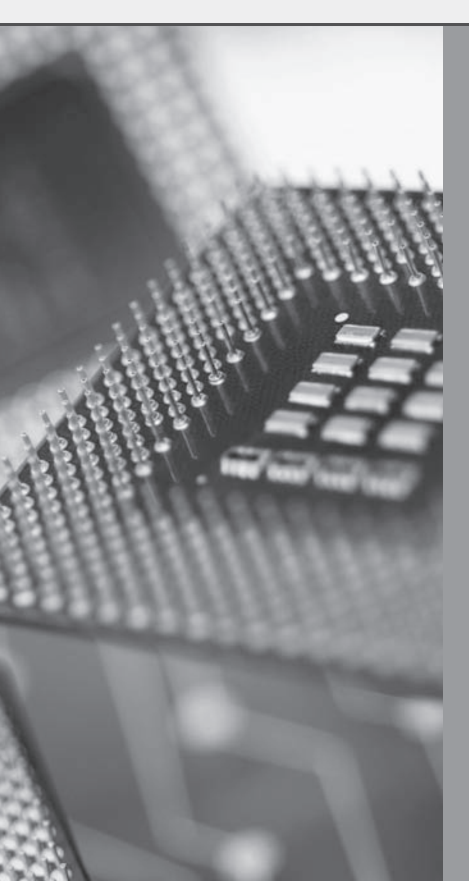
Un láser es un dispositivo sorprendentemente simple que consiste de un ***medio de ganancia*** y una ***cavidad óptica***. El medio de ganancia es una sustancia que puede pasar de un estado de energía más alto a uno más bajo y transfiere la energía asociada hacia el rayo láser. Los gases como neón, helio y argón hacen un excelente medio de ganancia, como lo hacen los cristales dopados con átomos de tierras raras como itrio, aluminio y granate. Una fuente de poder externa (generalmente corriente eléctrica) estimula al medio de ganancia hacia el estado de incitación. La cavidad óptica es en principio dos espejos que reflejan repetidamente un rayo de luz a través del medio de ganancia. Cada vez que el rayo pasa a través del medio de ganancia, incrementa en intensidad. Una esquema de un láser se muestra en la figura 8-23.

| *Medio de ganancia* |
Sustancia que pasa de un estado de energía más alto a uno más bajo y transfiere la energía asociada hacia un rayo láser.

| *Cavidad óptica* |
Par de espejos que repetidamente reflejan un rayo de luz a través del medio de ganancia de un láser.

Conceptualmente, la operación del láser es similar a un bulbo de luz incandescente; sin embargo, la luz generada por un láser es coherente, lo que significa que tiene una longitud de onda sencilla y se emite en un rayo bien definido.

Resumen del capítulo 8



En este capítulo se examinaron:

- Se comentaron por qué las propiedades eléctricas y ópticas garantizan cobertura separada.
- Se cxaminaron las bases físicas y químicas para la conducción de metales.
- Se calcularon la movilidad de deriva, la densidad de corriente y la conductividad.
- Se exploraron los factores que influyen en la resistividad y cómo determinar la resistividad de una aleación.
- Se obtuvo el aprendizaje acerca de la brecha de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción.
- Se comentaron la naturaleza de la semiconducción intrínseca y la migración de electrones y de agujeros en respuesta a un campo eléctrico aplicado.
- Se analizó el rol de los dopantes en semiconductores tipo *p* y tipo *n*.
- Se examinó la operación de los diodos con base en las uniones *p-n*.
- Se analizaron los principios operacionales de los transistores BJT y los MOSFET.
- Se aprendió la fabricación de los circuitos integrados.
- Se determinó el rol de los materiales dieléctricos en los condensadores.
- Se exploraron los comportamientos únicos de los materiales ferroeléctricos y piezoeléctricos.
- Se examinó la interacción entre las ondas electromagnéticas y los materiales.
- Se aplicaron la ecuación de Fresnel y la ley de Snell para examinar la refracción.
- Se revisaron las aplicaciones de las fibras ópticas y los láser.

Términos clave

agujero *p. 254*
aislante *p. 248*
ángulo crítico de incidencia *p. 266*
atenuación *p. 267*
banda de conducción *p. 254*
banda de valencia *p. 254*
bandas de energía *p. 249*
base *p. 259*
brecha de energía *p. 254*
cavidad óptica *p. 269*
circuitos análogos *p. 260*
circuitos digitales *p. 260*
circuitos integrados *p. 260*
coeficiente de Nordheim *p. 253*
coeficiente de reflexión *p. 264*
coeficiente de transmisión *p. 264*
colector *p. 259*
condensadores *p. 261*
conductividad eléctrica *p. 251*
constante dieléctrica *p. 261*
densidad de corriente *p. 250*
desarrollador *p. 260*
dieléctrico *p. 261*
diodo *p. 258*
DNQ-Novolac *p. 260*
donador de electrones *p. 257*
dopantes *p. 256*
ecuación de Fresnel *p. 264*
efecto piezoeléctrico *p. 263*
efecto piezoeléctrico converso *p. 263*
energía de Fermi *p. 249*
fibras ópticas *p. 267*
fotones *p. 264*
fotoresist *p. 260*
horneo suave *p. 260*
IGFET *p. 259*
índice de refracción *p. 264*
láser *p. 269*
ley de Moore *p. 261*
ley de Snell *p. 265*
litografía de proyección *p. 260*
máscara *p. 260*
materiales ferroeléctricos *p. 262*
materiales piezoeléctricos *p. 263*
medio de ganancia *p. 269*
MOSFET *p. 259*
movilidad de deriva *p. 250*
número cuántico principal *p. 249*
polarización *p. 258*
polarización inversa *p. 258*
receptor de electrones *p. 257*
recombinación *p. 258*
reflexión *p. 265*
reflexión difusa *p. 266*
reflexión especular *p. 266*
refracción *p. 265*
regla de Matthiessen *p. 253*
regla de Nordheim *p. 253*
resistividad eléctrica *p. 253*

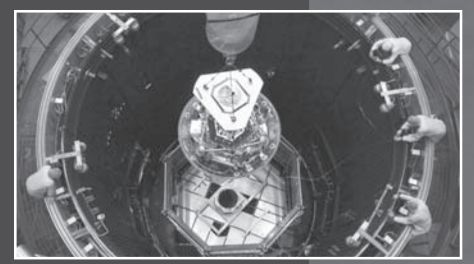
Problemas de tarea

1. ¿Por qué la conductividad eléctrica de los metales puros diminuye con la temperatura mientras que la de los semiconductores se incrementa?
2. Calcule la resistividad de una red cristalina de cobre con 2% de oro.
3. Calcule la movilidad de deriva del oro casi a temperatura ambiente.
4. ¿Cómo podría el cálculo de la movilidad de deriva diferir si se desarrolla para el zinc en vez de para el oro o la plata?
5. Explique el propósito de un material dieléctrico en un condensador.
6. Describa el rol del emisor en un transistor BJT.
7. Comente las ventajas del uso de MOSFET en vez de transistores BJT.
8. Comente el rol de la brecha de energía en la conducción y explique qué parámetros físicos influyen su magnitud.
9. Compare y contraste los semiconductores tipo *n* y tipo *p*.
10. Compare y contraste materiales piezoeléctricos con los materiales ferroeléctricos, y explique por qué el titanato de bario encaja en ambas definiciones.
11. Explique la relación entre las ecuaciones de densidad de corriente derivadas en las ecuaciones 8.12 y 8.15.
12. ¿Cómo podría el voltaje incrementado afectar el tamaño de la zona de depleción en una unión *p-n* polarizada?
13. Explique por qué la adición de un electrón de un átomo dopante a un semiconductor tipo *n* no resulta en la creación de un agujero.
14. ¿El fósforo fungiría como un donador de electrones o un receptor de electrones si se usara como una molécula dopante? Explique.
15. ¿Qué propiedades del silicio lo hacen útil para su uso en los semiconductores?
16. ¿Por qué los agujeros migran en la dirección del campo eléctrico aplicado?
17. Explique por qué los materiales poliméricos son aislantes muy efectivos.
18. Calcule la movilidad de deriva del cobre a casi temperatura ambiente.
19. Explique cómo se pueden usar los transistores para amplificar una señal eléctrica.
20. ¿Qué consideraciones deberían tenerse en cuenta al seleccionar una molécula dopante?
21. La mayoría de los circuitos integrados se fabrican en condiciones de ambiente limpio. Explique por qué este nivel de limpieza es necesario y cómo impacta el costo de los circuitos.
22. Como se comentó en el capítulo 6, los diamantes se consideran como la posible “siguiente generación” de materiales semiconductores. ¿Qué propiedades de los diamantes los hace candidatos atractivos?
23. Comente las ventajas de la litografía de proyección sobre la simple litografía de fotorresistencia.
24. Explique por qué los materiales piezoeléctricos son útiles en los transductores.
25. Genere una gráfica de densidades de transistores contra tiempo para los procesadores 286, 386, Pentium, Pentium 2, Pentium 3 y Pentium 4. (Necesitará buscar estos datos.) ¿Qué tan bien ha sido aplicada la ley de Moore? Extrapole los resultados para calcular las densidades de aquí a cinco años. ¿Qué barreras tecnológicas y económicas existen para la aplicabilidad continua de la ley de Moore?
26. ¿Qué propiedades físicas son más importantes en la selección de un medio de ganancia para un láser?
27. ¿Por qué el revestimiento de una fibra óptica tiene un índice más bajo de refracción que el núcleo?
28. Determine el ángulo crítico de incidencia para el aire con un índice de refracción de 1 y para el agua con un índice de refracción de 1.333.
29. Determine el ángulo crítico de incidencia para el PMMA con un índice de refracción de 1.49 y para el poliestireno con un índice de refracción de 1.60.
30. Si un rayo de luz que viaja a través del aire pega en un cubo de hielo (n = 1.309) a un ángulo de 15 grados, ¿Cuál será el ángulo del rayo refractado?



Biomateriales y materiales biológicos

Robert W. Grinn/ PhotoEdit









CONTENIDO

Objetivos de aprendizaje

Al final de este capítulo el estudiante debe se capaz de:

- Explicar en sus propias palabras las diferencias entre biomateriales, materiales biológicos, materiales bio-basados y materiales biomiméticos.
- Distinguir entre biomateriales estructurales y funcionales.
- Definir la biocompatibilidad y cómo impacta en el diseño de los biomateriales.
- Explicar la estructura del hueso y el rol de los cuatro principales tipos de células del hueso.
- Describir la autorreparación de huesos a través de la remodelación.
- Explicar el uso de los sujetadores de metal y los rellenos de hueso.
- Justificar la selección de materiales utilizados en las prótesis de cadera y explicar su rol.
- Evaluar las consideraciones de diseño y los materiales de construcción para extremidades de prótesis.
- Describir el rol de los stents vasculares en la angioplastía con balón.
- Comparar y contrastar el impacto del nitinol o del acero inoxidable como el material de opción para un stent vascular.
- Describir el uso de un catéter de Foley y explicar la base para la selección del material utilizado para hacer el catéter.
- Contrastar los materiales utilizados en los implantes mamarios de silicón y de solución salina y describir las controversias que rodean su uso.
- Comparar y contrastar las diferencias financieras, mecánicas y cosméticas entre el uso de amalgamas de metal tradicionales y compuestos dentales.

- Describir el rol de la membrana en la diálisis de riñón y comparar posibles materiales de membrana.
- Comentar las cuestiones de selección de material en corazones artificiales y dispositivos de asistencia ventricular.
- Comentar las propiedades mecánicas de la dermis y la epidermis y cómo la piel artificial emula estas propiedades.
- Explicar la fabricación de vejigas sintéticas a partir de materiales biológicos.
- Describir las distintas válvulas cardiacas mecánicas que se implantan y cómo impacta en el diseño la elección del material.
- Calcular un índice de desempeño para comparar el desempeño de las distintas válvulas de corazón con base en propiedades hemodinámicas.
- Distinguir entre homoinjertos, autoinjertos y xenoinjertos, sus ventajas y desventajas entre los mismos y las válvulas cardiacas mecánicas.
- Comentar las dos aproximaciones experimentales para desarrollar sangre artificial (oxigenoterapia), y explicar por qué la hemoglobina no se puede usar directamente para incrementar el flujo de oxígeno en la sangre.
- Describir los principales mecanismos para el control de lanzamiento de productos farmacéuticos.
- Explicar la construcción y el uso de un parche transdérmico.

¿Qué clases de materiales interactúan con los sistemas biológicos?

9.1 BIOMATERIALES, MATERIALES BIOLÓGICOS Y BIOCOMPATIBILIDAD

| *Biotecnología* | Rama de la ingeniería que involucra la manipulación de materiales inorgánicos y orgánicos para trabajar en tándem uno con el otro.

| *Materiales biológicos* | Materiales producidos por criaturas vivientes que incluyen huesos, sangre, músculos y otros materiales.

| *Biomateriales* | Materiales diseñados específicamente para su uso en aplicaciones biológicas como extremidades y membranas artificiales para diálisis así como en huesos y músculos.

Los biomateriales y los materiales biológicos son en realidad polímeros, metales, cerámicos y compuestos usados en sistemas vivos, pero debido al crecimiento acelerado de la ***biotecnología***, estos temas merecen su propio capítulo.

La distinción entre ***materiales biológicos***, biomateriales, materiales bio-basados y materiales biomiméticos fungen como un punto de comienzo importante para cualquier análisis sobre dichos materiales. Los materiales biológicos se producen por criaturas vivientes e incluyen huesos, sangre, músculos y una serie de otros materiales que sirven para muchas funciones diferentes. Los **biomateriales** se definen por la European Society for Biomaterials como “materiales cuya intención es tender interfaces con sistemas biológicos para evaluar, tratar, aumentar o reemplazar cualquier tejido, órgano o función del cuerpo”. Los ***materiales bio-basados*** no cumplen una función para un organismo pero son materiales derivados de tejido viviente como fécula de maíz o polímeros hechos de aceite de soya. Los ***materiales biomiméticos*** no son producidos por organismos vivientes pero son química y físicamente similares a los materiales que sí lo son. Como tal, encuentran su uso como reemplazos para materiales biológicos.

Clasificación del material	*Definición*
Materiales biológicos	Materiales producidos por criaturas vivientes incluyendo huesos, sangre, músculos y otros materiales.
Biomateriales	Materiales específicamente diseñados para su uso en aplicaciones biológicas como extremidades artificiales y membranas para diálisis así como huesos y músculos.
Materiales bio-basados	Materiales que se derivan de tejido viviente pero que no hacen la función de un organismo.
Materiales biomiméticos	Materiales que no son producidos por un organismo viviente pero que son química y físicamente similares a los que sí lo son.

| *Materiales bio-basados* |
Materiales que se derivan de tejido viviente pero que no sirven como una función para un organismo.

| *Materiales biomiméticos* |
Materiales que no son producidos por un organismo viviente pero son química y físicamente similares a los que sí lo son.

Los biomateriales se pueden clasificar aproximadamente en dos categorías primarias: ***biomateriales estructurales (o inertes)***, cuya función primaria es la de proporcionar un soporte físico para el cuerpo, y ***biomateriales funcionales (o activos)***, los cuales desempeñan una función en el cuerpo aparte del soporte físico. Los huesos artificiales, los stents en las arterias y las extremidades artificiales serían considerados como biomateriales estructurales; los órganos artificiales, los marcapasos y los implantes de liberación controlada entrarían en los biomateriales funcionales.

| *Biomateriales estructurales* |
Materiales diseñados para soportar la carga y proporcionar soporte a un organismo viviente como los huesos.

Los biomateriales enfrentan los mismos requerimientos de diseño que los materiales utilizados para las aplicaciones convencionales: deben tener una mezcla deseable de propiedades mecánicas y eficiencia en el costo; deben conservar sus propiedades por encima de la vida que se espera del material, y deben desempeñar la función para la cual fueron diseñados. Sin embargo, los biomateriales también deben poseer ***biocompatibilidad***, la capacidad de funcionar dentro de un organismo anfitrión pero sin provocar una ***respuesta inmune***. Las células sanguíneas blancas (incluyendo los macrófagos y las células asesinas naturales) están diseñadas específicamente para identificar materiales ajenos en el cuerpo y destruirlos. Si el biomaterial provoca la respuesta inmune, éste será rechazado por el cuerpo.

| *Biomateriales funcionales* |
Materiales que interactúan o reemplazan sistemas biológicos con una función primaria que no sea proporcionar soporte estructural.

| *Biocompatibilidad* |
Capacidad de un material para funcionar dentro de un anfitrión pero sin provocar una respuesta inmune.

El tema de los materiales biológicos y los biomateriales es amplio y evoluciona continuamente. Este capítulo cataloga a los materiales por su función principal, ya sea estructural o funcional, y luego compara y contrasta el material biológico natural con los biomateriales diseñados para reemplazarlo o interactuar con él.

| *Respuesta inmune* |
Células sanguíneas blancas que identifican un material foráneo en el cuerpo que intenta destruirlo.

¿Qué materiales biológicos proporcionan soporte estructural y qué biomateriales interactúan con ellos o los reemplazan?

9.2 MATERIALES BIOLÓGICOS ESTRUCTURALES Y BIOMATERIALES

9.2.1 // Hueso

El material biológico estructural más importante es el ***hueso***, un compuesto reforzado con fibra de ocurrencia natural que comprende los sistemas esqueléticos de la mayoría de los animales. El hueso consiste de ***colágeno*** orgánico, fibrillas en una matriz principalmente de fosfato de calcio. El colágeno es una

| *Hueso* |
Material biológico estructural que consiste de un compuesto reforzado con fibra y comprende el sistema esquelético de la mayoría de los animales.

| *Colágeno* |
Proteína estructural en huesos y piel con alta resistencia a la tracción.

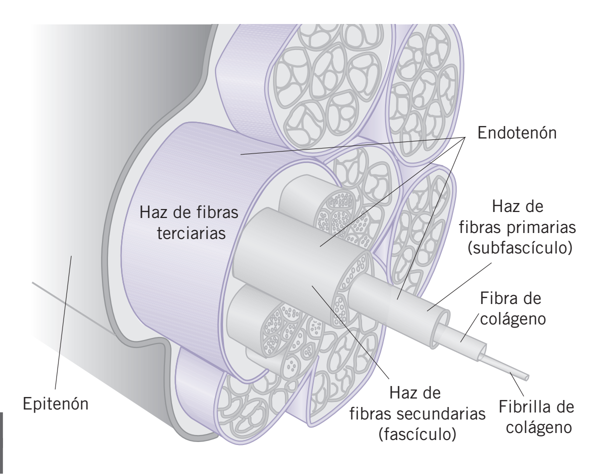


Figura 9-1 Esquema de la de fibra de colágeno

| *Escleroproteína* |
Proteína estructural con alta resistencia a la tracción.

| *Tejido óseo* |
Durante el crecimiento y la reparación, los huesos producidos en los que las fibrillas de colágeno aleatoriamente se alinean.

| *Laminado óseo* |
Hueso que reemplaza el tejido óseo, en el que las fibrillas de colágeno se alinean a lo largo de la longitud del hueso.

| *Hidroxiapatita* |
Material biomimético que se usa frecuentemente como un relleno de hueso cuando los osteoblastos no pueden reconectar piezas desunidas del hueso sin ayuda.

| *Osteoblastos* |
Células localizadas cerca de la superficie del hueso que producen osteoide.

| *Osteoide* |
Mezcla de proteínas estructurales (principalmente colágeno) y hormonas que regulan el crecimiento de huesos.

| *Células de alineación ósea* |
Células que sirven como una barrera iónica y alinean el hueso.

| *Osteocitos* |
Osteoblastos atrapados en la matriz del hueso que facilitan la transferencia de nutrientes y materiales de desperdicio.

| *Osteoclastos* |
Células que disuelven la matriz del hueso utilizando fosfatasa ácida y otros químicos para permitir al cuerpo reabsorber el calcio en el hueso.

| *Mineralización* |
Crecimiento de la matriz del hueso en fibrillas de colágeno.

proteína estructural de alta resistencia a la tracción (o ***escleroproteína***) que forma una subestructura de hélice triple con entrecruzamiento entre las hebras individuales. El colágeno justifica 40% de la proteína en la mayoría de los mamíferos y también proporciona el principal componente orgánico en la piel y los dientes. Una fibra típica de colágeno se muestra en la figura 9-1.

Los huesos se clasifican como tejidos o laminares, dependiendo de la orientación de las fibrillas de colágeno. Durante el crecimiento o la reparación, las fibrillas de colágeno se alinean aleatoriamente, muy similar a un compuesto de fibra picada. Este ***tejido óseo*** tiene una resistencia a la tracción comparativamente baja. A medida que el crecimiento continúa, el tejido óseo se reemplaza en forma gradual con ***laminado óseo***, en el que las fibrillas de colágeno se alinean a lo largo de la longitud del hueso.

La matriz predominante de fosfato de calcio proporciona al hueso una alta resistencia a la compresión pero es relativamente frágil. El fosfato de calcio se forma en una estructura de red cristalina hexagonal similar a la ***hidroxiapatita*** ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$). Las células óseas manejan la producción, reabsorción y reparación de estos compuestos de huesos durante toda su vida.
Existen cuatro diferentes tipos de células óseas:

1. Los ***osteoblastos*** son células localizadas cerca de la superficie del hueso que producen ***osteoides***, una mezcla de proteínas estructurales que contienen principalmente colágeno y hormonas que regulan el crecimiento de los huesos.
2. Las ***células de alineación ósea*** fungen como una barrera iónica y alinean el hueso.
3. Los ***osteocitos*** son las células más numerosamente presentes en el hueso. Los osteocitos empezaron como osteoblastos que se atraparon en la matriz y se desarrollaron en una serie de células con forma de estrella conectadas mediante canales estrechos que facilitan la transferencia de nutrientes y productos de deshecho.
4. Los ***osteoclastos*** son células destructoras del hueso que migran a áreas específicas del hueso y se hacen racimos en fosas de la superficie. Estas células liberan fosfatasa ácida y otros químicos que disuelven la matriz ósea y permiten que el calcio sea reabsorbido por el cuerpo.

Cuando es momento de que los huesos crezcan, las fibrillas de colágeno segregan osteoblastos junto con los osteoides. Durante el crecimiento de la matriz, llamado ***mineralización***, los osteoblastos liberan vesículas selladas que contienen la enzima fosfatasa alcalina, que escinde los enlaces de fosfato. El fos-

fato y el calcio comienzan a depositarse en las vesículas, las cuales se separan y sirven como un núcleo heterogéneo para facilitar el crecimiento de cristales.

El hueso es un material relativamente frágil, a pesar de la flexibilidad proporcionada por las fibrillas de colágeno, y tiende a sufrir agrietamientos y fracturas de superficie. Sin embargo, a lo largo de la vida del organismo, el hueso es continuamente reabsorbido y reemplazado a través de un proceso llamado ***remodelación***. La deformación resultante en microagrietamiento u otro daño produce un potencial químico pequeño debido a la naturaleza piezoeléctrica del hueso. Cuando se recibe la señal, los osteoclastos migran y se agrupan en las áreas dañadas y comienzan a reabsorber el hueso dañado. Finalmente, los osteoblastos producen nuevo colágeno y osteoides para reemplazar el hueso sin ningún cambio significativo en la forma.

| ***Remodelación*** |
Proceso continuo en el que el hueso es reabsorbido y reemplazado a través de la vida de un organismo.

Cuando se exponen áreas específicas a tensiones repetidas (como los antebrazos de los jugadores profesionales de tenis), el rango de crecimiento óseo se incrementa y el hueso se engrosa. La ley de Wolf indica que el hueso se adaptará a tensiones ambientales repetidas haciéndose más fuerte cuando es expuesto a altos niveles de tensión y haciéndose más débil cuando se reduce la tensión. Esta ley tiene implicaciones potenciales para los astronautas, quienes pueden ser sujetos a pérdida de hueso cuando son liberados de la fuerza de gravedad durante periodos extensos.

Aún cuando el hueso es un sistema material autocurativo y adaptable continuamente, los biomateriales se utilizan para ayudar a individuos con problemas específicos. Las pequeñas roturas se sanarán a sí mismas y a veces sólo requerirán una férula o un yeso para sostener al hueso en su lugar durante la remodelación. Cuando suceden roturas graves, la adición quirúrgica de tornillos de titanio, varillas o placas es necesaria para mantener al hueso en su lugar.

Cuando deben removerse grandes segmentos de hueso, los osteoblastos no pueden reconectar las piezas desunidas sin ayuda. La hidroxiapatita en polvo o perlada se utiliza como relleno óseo, creando un marco para soportar el crecimiento del nuevo hueso. La hidroxiapatita es un material biomimético que no produce el cuerpo, pero suficientemente similar en propiedades químicas y mecánicas para que lo acepte. Aunque la hidroxiapatita no es muy fuerte como para soportar cargas mecánicas, es termodinámicamente estable al pH del cuerpo, muy cercana en composición química y se hace parte de la matriz ósea creciente a través de un proceso llamado ***oseointegración***.

| ***Oseointegración*** |
Proceso en el que la hidroxiapatita se vuelve parte de la matriz ósea creciente.

En la gente joven, el rango de formación ósea excede el rango de la reabsorción. La máxima densidad y resistencia ósea ocurre alrededor de los 30 años. Cuando el rango de reabsorción excede el rango de producción de huesos nuevos resulta en un padecimiento médico llamado osteoporosis, dejando huesos porosos debilitados. La falta de calcio en la dieta y la falta de ejercicio son factores que contribuyen, pero la osteoporosis afecta a más de 10 millones de estadounidenses. El resultado más común de la osteoporosis son las fracturas de huesos. Más de 300 000 fracturas de cadera suceden en Estados Unidos cada año.

La cirugía de reemplazo de caderas se ha convertido en la norma en dichos casos. La cadera es una coyuntura en donde la cabeza femoral se extiende hacia la ***cavidad del acetábulo*** como se muestra en la figura 9-2. Cuando se lleva a cabo el reemplazo de cadera, la cabeza femoral es removida y reemplazada con un implante de titanio o cobalto de acero inoxidable que incluye una cabeza femoral en forma de bola y un tallo grande que se extiende hacia la médula en el centro del fémur como se muestra en la figura 9-3. La cabeza femoral de reemplazo generalmente está hecha de titanio o alúmina, pero los avances recientes en ***biocerámicos*** han resultado en el uso de ***cabezas femorales Y-TZP*** de policristales tetragonales de zirconio itrio estabilizados, las cuales ofrecen mejores rangos de uso y mejores resistencias y permiten que las cabezas con diámetros más pequeños se puedan usar.

| ***Cavidad del acetábulo*** |
Cavidad de la cadera hacia la cual se extiende la cabeza femoral.

| ***Biocerámicos*** |
Cerámicos utilizados en aplicaciones biomédicas.

| ***Cabezas femorales Y-TZP*** |
Cabeza femoral artificial de reemplazo de biocerámico que utiliza policristales tetragonales de zirconio itrio estabilizadas, las cuales ofrecen mejor rango de uso y mejor resistencia que las cabezas femorales de titanio o aluminio.

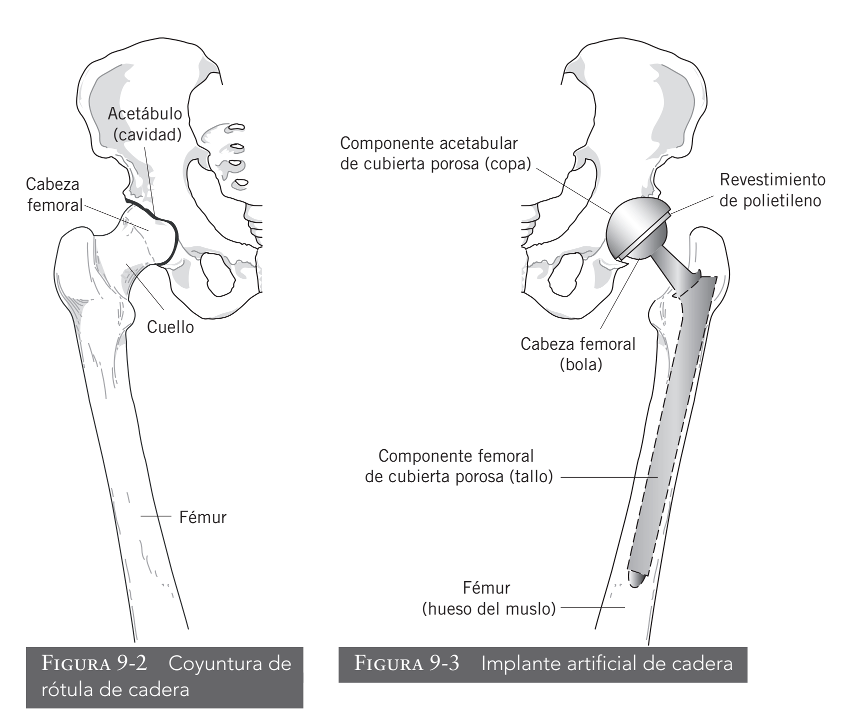


Figura 9-2 Coyuntura de rótula de cadera

Figura 9-3 Implante artificial de cadera

El implante se cubre con hidroxiapatita para reducir cualquier oportunidad de respuesta inmune para facilitar la oseointegración, ya que la hidroxiapatita ya está presente en el cuerpo y no desencadena una respuesta. La cabeza femoral de titanio se cubre con un revestimiento de polietileno y una copa de polietileno o cerámica (óxido de aluminio), la cual se fija a la cavidad acetabular utilizando cemento óseo (polimetilmetacrilato) lubricado con líquido sinovial, fluido filamentoso que existe naturalmente y que se encuentra en las coyunturas. La bola de titanio puede rotar dentro de la copa proporcionando movilidad. Los desarrollos recientes incluyen el uso de implantes sin cemento que se basan en la oseointegración para asegurar la copa en su lugar.

Los biomateriales utilizados en los reemplazos de cadera aun enfrentan muchos retos. Debido a que los metales biocompatibles utilizados en el reemplazo son mucho más fuertes que el hueso natural, se aplica menor carga al hueso remanente. La ley de Wolf estipula que menos carga en un hueso resultará en menos hueso, así que el hueso alrededor del metal se hace más débil y delgado. La lubricación de coyunturas natural con frecuencia es insuficiente, y el tratar de cubrir los implantes con Teflón y otros lubricantes semipermanentes ha fallado. El líquido sinovial que se da naturalmente puede corroer el metal, llevando a compuestos potencialmente tóxicos. Los reemplazos de cadera son una solución temporal que no durará más de 10 a 20 años con los materiales actuales.

9.2.2 // Prótesis de extremidades

| ***Prótesis de extremidades*** | Extremidades artificiales de reemplazo..

Las ***prótesis de extremidades*** representan otra aplicación importante para los biomateriales estructurales. Durante muchos años las piernas consistían de estacas de madera o de metal aseguradas a la rodilla a través de una serie de correas que le permitían a un amputado caminar (con dificultad) y nada más. La primera prótesis no asegurada apareció en 1696 y utilizaba bisagras externas para permitir el pivoteo alrededor del tobillo. Para 1800 se desarrolló un sistema de poleas para el movimiento de los pies. Este sistema permitió un paso de caminata más normal, pero la tecnología se estancó durante 150 años.

En 1946, la American Orthotics and Prosthetics Association fue autorizada para mejorar las prótesis. Durante los pasados 60 años, una nueva generación de materiales y diseños para prótesis han revolucionado el campo y ofrecen una mejor calidad de vida para los amputados. Aun las prótesis modernas no cumplen totalmente con el desempeño de la extremidad natural, pero las prótesis han avanzado al punto de que muchos amputados participan en eventos atléticos.

Las ***prótesis transtibiales,*** extremidades artificiales que comienzan debajo de la rodilla como la que se muestra en la figura 9-4, son las más comunes. La porción de arriba de la prótesis debe encajar de una manera segura en lo que queda de la extremidad. La extremidad frecuentemente es sensible a la presión, así es que una cavidad dura se moldea a la perfección a partir de polipropileno y/o materiales de compuestos de fibras de carbono. Un revestimiento ligero de silicón se pone entre la cavidad y lo que queda de la extremidad para amortiguar.

| ***Prótesis transtibiales*** |
Extremidades artificiales que comienzan por debajo de la rodilla.

Para reemplazar lo que falta de la tibia, todas las prótesis transtibiales contienen una gran barra llamada ***quilla*** la cual debe soportar las fuerzas compresivas importantes asociadas con el caminar. La mayoría de las veces, la quilla se hace de compuestos de titanio o de fibra de carbono. Debe ser rígida pero tener capacidad de flexión. Si el módulo elástico del material es muy alto, caminar y correr sería doloroso, ya que se transmitiría más de la fuerza de caminata a lo que queda de la extremidad. Si el módulo elástico es muy bajo, mantener el equilibrio al caminar o correr sería difícil.

| ***Quilla*** |
Barra grande que reemplaza la tibia faltante en una prótesis de extremidad transtibial.

La mayoría de las prótesis transtibiales son no articuladas (no se flexionan en el tobillo); el pie se alinea a un ángulo de 90 grados desde el tobillo. El pie más común es un ***pie articulado con tobillo macizo (SACH)*** que es durable y de costo comparativamente bajo. El tobillo contiene una cuña de goma compresible en el talón con una quilla sólida (frecuentemente de madera) en el fondo del pie para proporcionar estabilidad como se muestra en la figura 9-5. Las combinaciones de tobillo-pie diseñadas para atletas deben tener un rango de movimiento más amplio y ser articuladas, pero son menos estables y tienen mayor peso.

| ***Pie SACH*** |
Pie articulado con tobillo macizo; la prótesis transtibial más común, la cual contiene una cuña de goma en el tobillo y una quilla sólida, frecuentemente de madera.

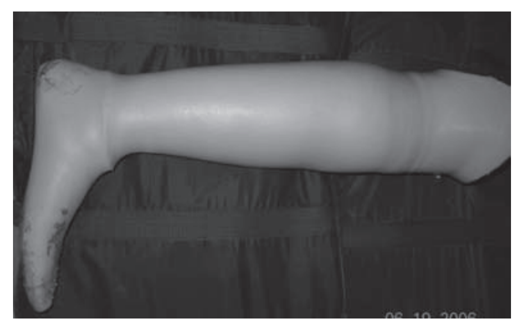


Figura 9-4 Prótesis transtibial

Cortesía de James Newell

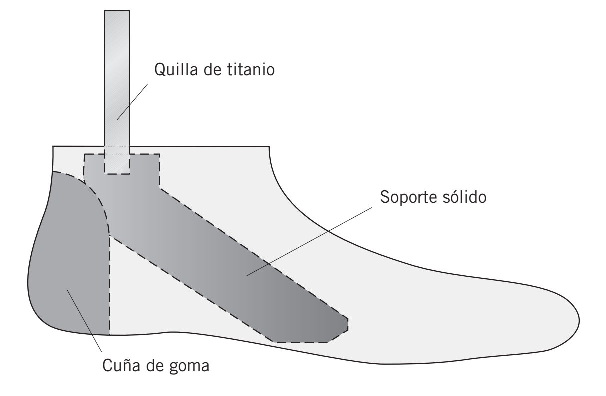


Figura 9-5 Esquema de un pie SACH

Los brazos de prótesis presentan distintos retos. Aunque no tienen las mismas responsabilidades de soporte de carga que las piernas de prótesis, y la coyuntura del codo no es más complicada que la rodilla, el rango de movimientos y requerimientos para las manos son mucho más complejas que para los pies. Hasta 1909 las opciones para las prótesis de brazos consistían en una cavidad de piel que cabía en lo que quedaba de la extremidad y un marco de acero incómodo que soportaba ya fuera un simple gancho (que sigue siendo popular hoy en día en las películas de terror) o una mano sintética que se veía más real pero ofrecía poca funcionalidad.

En 1909, el médico D. W. Dorrance desarrolló la primer prótesis de brazo con capacidad de prensión. Su sistema de división de ganchos podía abrirse y cerrarse, dándole al usuario un poco de habilidad para agarrar objetos. El diseño básico del sistema utiliza un arnés y un cable que se engancha alrededor del hombro opuesto para proporcionar control de la extremidad. Hoy en día muchos amputados transradiales utilizan esta estructura del ***hook Dorrance***, pero con materiales más actuales; la cavidad generalmente está hecha de polipropileno en vez de cuero utilizada en la original; el acero en la estructura es de aleaciones de aluminio o titanio o hasta compuestos de fibra de carbono en algunos casos; la estructura se cubre con una espuma de poliuretano hecho a la medida para emular la forma del otro brazo, y una media (hecha generalmente de Lycra) cubre la espuma y se le da color como para que sea igual al tono de piel del amputado.

| *Hook Dorrance* |
Sistema de división de ganchos para amputados transradiales que ofrece cierta capacidad prensil.

La innovación más importante en las prótesis ***transradiales*** ha sido el desarrollo de ***brazos mioeléctricos***, brazos artificiales que responden a los impulsos de los músculos del amputado para controlar la función de la prótesis. Los impulsos eléctricos de lo que queda del brazo de arriba son transferidos a través de electrodos en la cubierta de la prótesis a los circuitos en el brazo que desencadenan respuestas que emulan una mano regular. Aunque estas manos mioeléctricas están disponibles ahora comercialmente y están cubiertas por algunos planes de seguros, hasta ahora no tienen la durabilidad de otras opciones de prótesis transradiales.

| *Transradiales* |
Debajo del codo.

| *Brazos mioeléctricos* |
Prótesis transradiales que utilizan los impulsos del músculo en el brazo residual para controlar la función de la prótesis.

Dean Kamen, el inventor del tan popular Segway y una miríada de otros artículos, ha desarrollado el prototipo para lo que seguramente será la siguiente generación de prótesis transradiales. Su "brazo de Luke", llamado así debido a la mano biónica utilizada por el personaje Luke Skywalker en el filme *El imperio contra ataca* ofrece 18 grados de libertad y es capaz de imitar la mayoría de los movimientos más sutiles de la mano humana.

| *Angioplastía con balón* |
Procedimiento utilizado para direccionar los bloqueos arteriales que pueden reemplazar el procedimiento quirúrgico del bypass más invasivo. Un balón es puesto junto con un alambre guía e inflado en el área obstruida para expandir la apertura del vaso.

9.2.3 // Stents vasculares

Durante gran parte del siglo xx, la cirugía de bypass era el único procedimiento viable para direccionar los bloqueos arteriales. Sin embargo, una combinación de ***angioplastía de balón*** y la inserción de ***stents vasculares*** ha reemplazado la cirugía de bypass más invasiva en más de 1 millón de casos por año en Estados Unidos. Durante la angioplastía se mete un delgado alambre guía a través del área obstruida en la arteria. Se mete un balón junto con el alambre y se infla en el área obstruida para expandir la apertura del vaso, rompiendo el revestimiento interno de la arteria y quitando el bloqueo. Un stent vascular es una malla metálica pequeña que se inserta en el vaso sanguíneo durante una angioplastía para ayudar a mantener la arteria abierta después del procedimiento. Sin el stent, la arteria se vuelve a colapsar hasta su diámetro original en casi 40% de las angioplastías.

| *Stents vasculares* |
Mallas metálicas pequeñas insertadas en los vasos sanguíneos durante la angioplastía para mantener la arteria abierta después del procedimiento.

Los stents vasculares son de dos tipos básicos: de balón expandibles y autoexpandibles. Los ***stents de balón expandibles*** se ajustan durante la angioplastía de balón y se expanden cuando el balón se infla. En 1987, el doctor Julio Palmaz desarrolló el primer stent de balón expandible, el cual abrió el camino para todos

| *Stents de balón expandibles* |
Stents que caben en el balón de angioplastía y se expanden cuando se infla el balón.

los que siguieron. Los ***stents autoexpandibles*** no son introducidos en la angioplastía de balón pero son desplegados mediante el uso de un catéter.

El ***stent de Palmaz***, figura 9-6, era hecho de acero inoxidable, material de opción durante muchos años y que aún se utiliza en algunos stents. Los stents de acero inoxidable frecuentemente desencadenan ***reestenosis***, la acumulación de tejido cicatricial alrededor del stent que lleva a la restricción del torrente sanguíneo. Sin embargo, las propiedades únicas de una aleación de níquel-titanio llamada ***nitinol*** ha revolucionado la fabricación del stent. El nitinol se somete a una transformación sin difusión de una estructura FCC (cúbica de cara centrada) similar a la austenita, a una estructura BCC (cúbica de cuerpo centrado) análoga a la martensita. Esta transformación provoca que el stent de nitinol experimente un ***efecto de memoria de forma*** en la que una aleación de nitinol deformada no cambia la forma cuando la carga se remueve pero regresa a su posición de red cristalina inicial cuando se calienta. Cuando el stent de nitinol se utiliza en el vaso sanguíneo, la temperatura del cuerpo de 38° C es suficiente para provocar una transformación de fase de vuelta al estado austenítico.

El nitinol no es inherentemente biocompatible, y la exposición prolongada a los fluidos corporales podría resultar en la lixiviación de níquel tóxico en el fluido sanguíneo, así es que una capa de metal pasivante aprobado por la Food and Drug Administration (FDA) debe cubrir la superficie de los stents de nitinol. Adicionalmente, la mayoría de los stents están cubiertos con delgadas capas de polímeros infundidos con fármacos retardantes de la reestenosis que lentamente se difunden y reducen el desarrollo de tejido cicatricial en la arteria. Un stent de nitinol típico se muestra en la figura 9-7.

Los ***catéteres*** son tubos que se insertan en los vasos o ductos del cuerpo, generalmente para promover ya sea la inyección o el drenaje de los fluidos. Aunque los catéteres se usan para una variedad de propósitos, incluyendo el drenado de abscesos y la introducción de fluidos intravenosos, la medicación o la anestesia, el uso de un ***catéter de Foley*** para reemplazar una uretra dañada tiene cuestiones importantes sobre la selección de materiales. El catéter de Foley, mostrado en la figura 9-8, es un tubo flexible insertado a través de la punta del pene hacia la vejiga para drenar la orina.

Los catéteres de Foley se hacen a partir de una variedad de materiales, incluyendo látex, cloruro de polivinilo (vinilo) y silicón. Los catéteres de látex son los más comunes pero tienen desventajas, incluyendo reacciones alérgicas comunes al látex que se incrementan entre los pacientes y una tendencia a soportar colonias bacteriales. Las infecciones del tracto urinario suceden dentro de los cuatro días siguientes al uso del catéter de Foley de látex mientras que los catéteres de silicón pueden durar varias semanas sin infección. Los catéteres de silicón ofrecen el mejor desempeño de todos pero son significativamente más caros que los de látex o vinilo. Los catéteres de vinilo presentan un asunto comprometedor en el desempeño y el costo pero presentan retos sobre ellos mismos.

| *Stents autoexpandibles* |
Stents que son desplegados mediante el uso de un catéter.

| *Stent de Palmaz* |
Stent de balón expandible hecho de acero inoxidable.

| *Reestenosis* |
Acumulación de tejido cicatricial alrededor de un stent, que lleva a una restricción en el torrente sanguíneo.

| *Nitinol* |
Aleación de níquel-titanio utilizada en la fabricación de stents que experimenta un efecto de memoria de forma.

| *Efecto de memoria de forma* |
Efecto en el que la aleación no cambia la forma cuando la carga se remueve pero regresa a su posición de red cristalina inicial cuando se calienta.

| *Catéteres* |
Tubos insertados en los vasos o ductos del cuerpo, generalmente para promover la inyección o drenaje de fluidos.

| *Catéter de Foley* |
Tubo utilizado para reemplazar una uretra dañada.



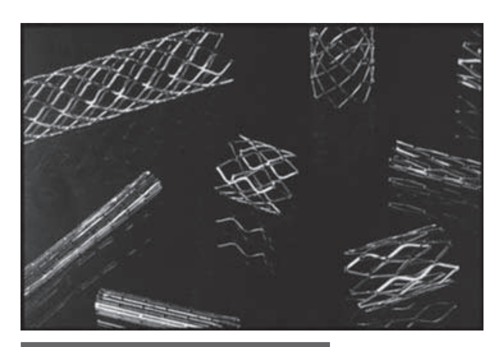


Figura 9-6 Stent de Palmaz

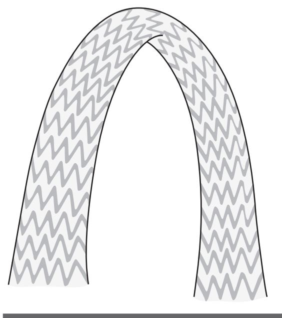


Figura 9-7 Stent de nitinol



Figura 9-8 Catéter de Foley

Los catéteres de Foley deben ser suaves y flexibles. El PVC es extremadamente duro a menos que se añadan plastificadores para suavizarlos como se comentó en el capítulo 4. Las preocupaciones sobre la probabilidad de que estos plastificadores tengan lixiviación fuera del catéter y dentro del cuerpo persisten.



| *Implantes de senos* |
Bolsas rellenas de líquido insertadas quirúrgicamente en el cuerpo para aumentar el tamaño de los senos o reemplazar el tejido de los senos que ha sido quirúrgicamente removido.



| *Implante de gel de silicón* |
Implante de senos que utiliza un saco de caucho de silicón relleno de gel de silicón.



| *Contractura capsular* |
Endurecimiento del tejido cicatricial alrededor de un implante de seno que puede llevar a su rotura.

| *Silicón extracapsular* |
Silicón que se escapa de la cápsula dura de tejido cicatricial que rodea a un implante de seno y está libre para migrar a través del cuerpo.

9.2.4 // Implantes de senos

Los ***implantes de senos*** se utilizan para aumentar el tamaño del seno o para reemplazar el tejido de los senos que ha sido removido quirúrgicamente, con frecuencia debido al cáncer. El aumento de los senos es ahora la tercer cirugía cosmética más común realizada en Estados Unidos con casi 300 000 operaciones cada año. El costo total de esta cirugía varía de los $4 000 a los $10 000 dólares, haciendo de los implantes de senos una industria de mil millones de dólares anuales.

Los primeros implantes de senos ocurrieron poco después de la Segunda Guerra Mundial e involucraban la inyección directa de silicón en los senos. Los resultados eran desastrosos. Resultaban numerosas complicaciones, llevando a las receptoras a someterse a mastectomías, y al menos tres mujeres morían por bloqueos en los vasos sanguíneos causados por el silicón inyectado.

En 1962, la empresa Dow Corning produjo el primer ***implante de gel de silicón*** comercial que utilizaba un saco de caucho de silicón relleno de un gel de silicón. La figura 9-9 muestra implantes de gel de silicón. Debido a que los dispositivos médicos no estaban regulados en Estados Unidos hasta mediados de los años setenta, no existen estudios detallados sobre los efectos en la salud de estos primeros implantes. Sin embargo, se sabe que ocurrieron diversos problemas al respecto. Como parte de la respuesta inmune, el tejido cicatricial se forma alrededor de un implante, creando una barrera del resto del cuerpo. En algunos casos, esta barrera se endurece, llevando a la ***contractura capsular***, la cual se comprime y potencialmente rompe el implante. La contractura capsular provoca dolor significativo y puede causar que el seno se deforme.

Cuando un saco tiene una fuga, el gel de silicón que escapa de la barrera de tejido cicatricial se vuelve libre para migrar a través del cuerpo. Este ***silicón extracapsular*** puede resultar en consecuencias de salud adicionales, aunque la naturaleza, frecuencia y severidad de estas consecuencias sigue siendo un tema de gran debate.

En los años setenta los implantes de silicón fueron alterados para tener geles más delgados, sacos más delgados y una capa de poliuretano diseñada para reducir la contractura capsular. La FDA prohibió los implantes cubiertos de poliuretano después de que se descubrió que se descomponían en un químico carcinogénico. Los sacos más delgados también eran más propensos a la rotura. Éstos finalmente fueron reemplazados con un diseño involucrando dos cámaras, una



Figura 9-9 Implantes de gel de silicón

Cortesía de Food and Drug Administration



Figura 9-10 Implantes de senos de solución salina

Cortesía de Food and Drug Administration

cámara interna rellena de gel de silicón y una cámara externa rellena con salinas para reducir la oportunidad de rotura que lleva al silicón extracapsular.

Las preocupaciones respecto a la salud resultaron en la total prohibición de los implantes de silicón en Canadá y en el uso restringido en Estados Unidos. A partir de 1992 a 2006, la FDA limitó el uso de implantes de gel de silicón al reemplazo de implantes de gel de silicón existentes que se habían roto o a estudios clínicos controlados para la reconstrucción después de las mastectomías. La tecnología actual utiliza ***implantes de senos de silicón de oso gummy*** con una forma estable. El gel es cohesivo, así es que es mucho menos propenso a fugarse hacia el cuerpo. Estos implantes se usan extensivamente fuera de Norte América y muestran muchos menos problemas de salud que sus predecesores, pero no fueron aprobados en Estados Unidos sino hasta noviembre de 2006. La FDA requiere a los fabricantes que desarrollen un estudio postaprobatorio de 10 años y 40 000 mujeres que reciban los nuevos implantes.

Los ***implantes de senos de solución salina***, figura 9-10, ofrecen una alternativa al silicón. Estos implantes aparecieron por primera vez a mediados de los años sesenta pero fueron descontinuados en los años setenta debido a problemas persistentes con la rotura. Cuando las controversias acerca de los implantes de silicón erupcionaron en los años noventa, los implantes salinos emergieron como la opción líder de implantes. Los nuevos implantes salinos utilizan caparazones más gruesos, vulcanizados a temperatura ambiente (RTV, por sus siglas en inglés) que resisten la rotura. Aunque los implantes salinos ofrecen menores complicaciones, no pueden replicar la apariencia más natural de los implantes de gel de silicón.

9.2.5 // Dientes y rellenos de dientes

El tejido suave viviente en el centro de los dientes se llama ***pulpa dental.*** Está protegido por tres capas de materiales, esmalte, dentina y cemento, como se muestra en la figura 9-11. El ***esmalte*** es la sustancia más dura en el cuerpo y consiste principalmente de hidroxiapatita, muy parecido a los huesos. El grosor de la capa de esmalte varía dependiendo de su ubicación pero puede ser de hasta 2.5 mm. Aunque es extremadamente duro, el esmalte dental es también un poco frágil.

La ***dentina*** es un material amarillo, poroso, compuesto de colágeno y otras proteínas estructurales mezcladas con un mineral de fosfato de calcio hexagonal llamado ***dahlite***. El ***cemento*** es un material óseo cuya función primaria es la de proporcionar un punto de unión para los ligamentos periodontales. Es amarillo, más suave que la dentina o el esmalte y consiste de aproximadamente 45% de hidroxiapatita, 33% de proteínas estructurales y 22% de agua.

| ***Implantes de senos de silicón de oso gummy*** |
Implantes de senos de silicón que eliminan o por lo menos reducen significativamente la fuga del gel de silicón. Llamado así debido a que la textura de la bolsa se asemeja al famoso dulce de gomita.

| ***Implantes de senos de solución salina*** |
Alternativa a los implantes de senos de silicón que utiliza salinas en vez de silicón en la bolsa.

| ***Pulpa dental*** |
Tejido suave viviente en el centro de un diente.

| ***Esmalte*** |
La sustancia más dura en el cuerpo que cubre los dientes y consiste principalmente de hidroxiapatita.

| ***Dentina*** |
Material amarillo, poroso, compuesto de colágeno y otras proteínas estructurales mezcladas con dahlite.

| ***Dahlite*** |
Mineral de fosfato de calcio hexagonal en la dentina.

| ***Cemento*** |
Capa de material óseo en los dientes que principalmente proporciona un punto de unión para los ligamentos periodontales.

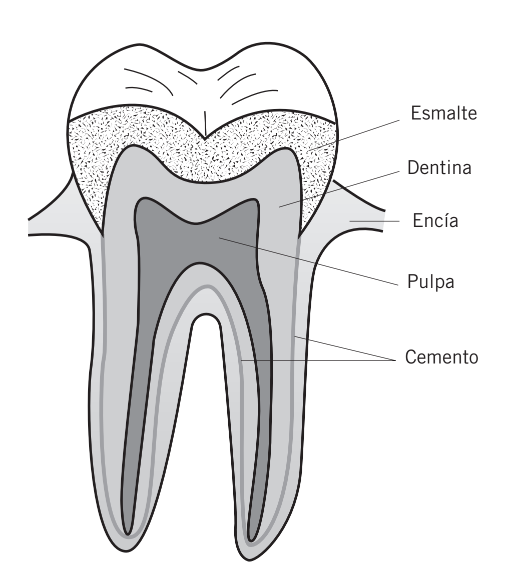


Figura 9-11 Esquema de un diente que muestra las distintas capas de materiales

La hidroxiapatita presente en las tres capas protectoras está sujeta al ataque de los ácidos. Muchas bacterias que residen en la boca interactúan con los azúcares para producir ácido láctico, lo cual baja el pH de la boca y comienza a disolver el esmalte. Mientras más hidroxiapatita se degrada, la superficie del diente se suaviza y generalmente provoca una cavidad.

| *Amalgamas* | Aleación basada en mercurio utilizada para rellenos dentales.

| *Amalgama de fase gamma 2* | Amalgama que contiene 50% de mercurio y 50% de un polvo de aleación hecho de al menos 65% de plata, menos de 29% de estaño, alrededor de 6% de cobre y pequeñas cantidades de mercurio y zinc.

| *Amalgama de alto cobre* | Amalgama que contiene 50% de mercurio líquido y 50% de un polvo de aleación hecho de 40% de plata, 32% de estaño, 30% de cobre y pequeñas cantidades de mercurio y zinc.

| *Compuestos dentales* | Reemplazos de amalgamas que se ven casi como dientes naturales pero son mucho más caras y no duran mucho.

| *Resina bis-GMA* | Material aglutinante en la mayoría de los compuestos dentales, junto con materiales de relleno como polvo de vidrio.

Los rellenos dentales datan de al menos el siglo XVI, cuando el plomo y el corcho se utilizaban para rellenar las cavidades. El primer material estándar para los rellenos dentales eran aleaciones de mercurio llamadas ***amalgamas***. A principios de 1895, la amalgama dental estándar era la ***amalgama de fase gamma 2***, una mezcla que contiene 50% de mercurio y 50% de un polvo de aleación que contiene al menos 65% de plata, menos de 29% de estaño, alrededor de 6% de cobre y pequeñas cantidades de mercurio y zinc. Alrededor de 1970, la formulación estándar para las amalgamas dentales cambió a ***amalgamas de alto cobre***, principalmente por razones económicas. La nueva amalgama contenía 50% de mercurio líquido, pero el nuevo polvo de aleación estaba compuesto de alrededor de 40% de plata (el material más caro en la aleación), 32% de estaño, 30% de cobre y pequeñas cantidades de mercurio y zinc.



Las amalgamas siguen en uso debido a su mezcla de dureza, fácil manufactura y bajo costo, pero han surgido ciertas preocupaciones sobre los efectos del mercurio en la salud. Aun niveles bajos de mercurio en el cuerpo se han asociado con defectos de nacimiento, dificultades del sistema nervioso y desórdenes mentales. Muchos científicos argumentan que el mercurio está mezclado en la nueva amalgama y que sólo cantidades mínimas pueden fugarse hacia el cuerpo. Sin embargo, el uso de amalgamas está declinando mientras más dentistas optan por los compuestos dentales, que se ven más como dientes naturales.

Los ***compuestos dentales*** son más caros que las amalgamas y no duran mucho. Se esperaría que una típica amalgama durara de 10 a 15 años, mientras que 8 años es más común para un compuesto dental. El compuesto dental más común involucra una ***resina bis-GMA (acrílico de glicidilmetacilato de bisfenol)*** junto con materiales de relleno como el polvo de vidrio. Los materiales de relleno reducen el costo del proceso pero también reducen el encogimiento de la resina durante la curación. El compuesto se fabrica capa por capa al mismo tiempo que la resina es curada a cada nivel mediante luz. La formación de radicales libres es esencial para la curación de la resina, así es que los catalizadores fotoquímicos como la canforoquinona se añaden al compuesto.

A diferencia de los rellenos de amalgamas, los rellenos de compuestos se unen con el esmalte dental remanente. Como resultado, los rellenos de compuestos son menos propensos a fracturarse aun cuando tienen menor tensión inherente que los rellenos de amalgamas. Adicionalmente, los rellenos de amalgamas se expanden con el tiempo y pueden agrietar al mismo diente. Al contrario, los rellenos de compuestos se encogen y son más propensos a caerse.

¿Qué biomateriales hacen una función no estructural en el cuerpo?

9.3 BIOMATERIALES FUNCIONALES

Los biomateriales funcionales tienen un propósito más allá de la estructura en el cuerpo. Pueden estar tan involucrados como los órganos artificiales que reemplazan todo o parte del funcionamiento de una parte corporal o elementos más simples como los marcapasos que ayudan a controlar las señales eléctricas que hacen latir al corazón. En muchos casos, los biomateriales funcionales son implantados en el cuerpo, pero algunas veces, los materiales son tomados del cuerpo, pasados a través del biomaterial funcional y luego regresados.

9.3.1 // Órganos artificiales

En la mayoría de los casos, el mejor reemplazo para un órgano defectuoso es un órgano trasplantado de otra persona. Sin embargo, la disponibilidad limitada de órganos trasplantados compatibles ha hecho del uso de los órganos artificiales una necesidad médica.

Los riñones son responsables de eliminar la urea, otros productos de desecho y exceso de fluidos del torrente sanguíneo. Cuando los riñones no son capaces de llevar a cabo totalmente esta función, los pacientes son tratados con un sistema de filtración de membranas llamado ***diálisis***. En la forma más común de la diálisis, la ***hemodiálisis***, la sangre de un paciente se remueve mediante un catéter y se pasa a través de una membrana semipermeable. El ***fluido de diálisis*** (agua esterilizada, altamente purificada con sales minerales específicas) corre por el otro lado de la membrana como se muestra en la figura 9-12. La presión diferencial hace que el agua pase a través de la membrana, reduciendo el exceso de fluidos y la concentración de electrolitos en la sangre. A este proceso se le llama ***ultrafiltración***. Simultáneamente, los gradientes de concentración hacen que la urea y otras toxinas se difundan a través de la membrana y fuera de la sangre. La diálisis generalmente requiere de varias horas por sesión y muchas veces se requiere tan frecuente como tres veces por semana.

La membrana es la piedra angular del proceso de diálisis. La membrana debe ser:

- Permeable a la urea y otros desperdicios.
- Impermeable a las células sanguíneas, plasma y otros componentes clave.
- Suficientemente fuerte como para soportar las presiones diferenciales.
- Suficientemente biocompatible como para no provocar una respuesta inmune de la sangre.

El material más común utilizado en la hemodiálisis es el acetato de celulosa, también llamado *celulosa regenerada inmodificada*. De hecho, las primeras membranas de diálisis estaban hechas de envolturas de celofán de salchichas.

| ***Diálisis*** |
Sistema de filtración de membrana utilizado en pacientes cuyos riñones no son capaces de manejar completamente el removimiento de la urea, otros productos de desecho y el exceso de fluidos del torrente sanguíneo.

| ***Hemodiálisis*** |
La forma más común de la diálisis, en la que la sangre del paciente es removida mediante un catéter y pasada a través de una membrana semipermeable para remover las toxinas y el exceso de agua.

| ***Fluido de diálisis*** |
Agua esterilizada, altamente purificada con sales minerales específicas utilizada en la diálisis.

| ***Ultrafiltración*** |
Proceso en el que la presión diferencial provoca que el agua pase a través de la membrana en la diálisis, reduciendo el exceso de fluido y la concentración de electrolitos en la sangre.

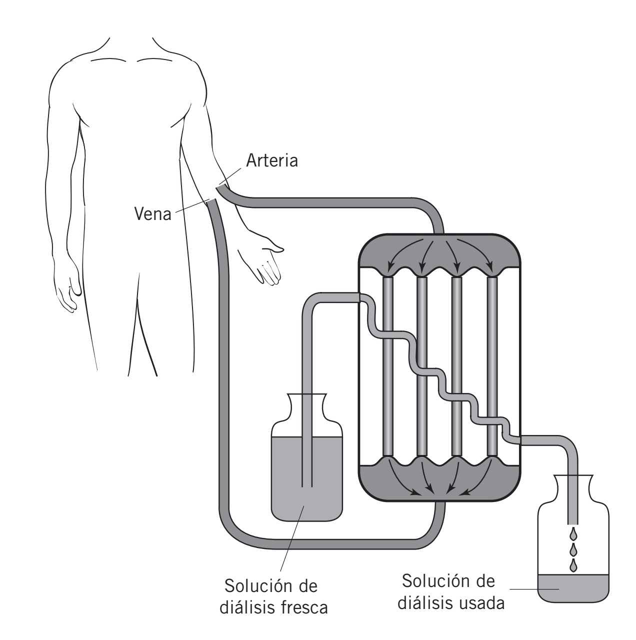


Figura 9-12 Esquema de la hemodiálisis

El acetato de celulosa es relativamente barato y es poroso al fluido, pero los tamaños del poro son lo bastante pequeños como para evitar que las células de la sangre, las proteínas y otros factores clave pasen a través del mismo.

La biocompatibilidad de las membranas de acetato de celulosa ha sido problemático; a través de los años, un número importante de reacciones negativas se han reportado. Se realizan tratamientos de superficie en el acetato de celulosa para hacerlo menos hidrofílico y más biocompatible. Materiales de membrana alternativos incluyen polisulfona, PMMA y PAN. Estos polímeros generalmente se preparan como tubos huecos. La sangre del paciente corre a través del centro del tubo con el fluido de diálisis corriendo a través del exterior. Aunque estas membranas poliméricas son más caras, tienen menos elementos de biocompatibilidad.

El corazón es el órgano responsable de bombear la sangre a través del cuerpo. Cuando una enfermedad del corazón es muy grave como para que el paciente espere un donador de órganos, algunas veces se utiliza un corazón artificial. Desde 1969, un paciente fue mantenido con vida durante 60 horas utilizando un corazón mecánico, pero el momento pináculo de los corazones artificiales llegó en 1982, cuando un ***corazón artificial Jarvik-7*** fue implantado en el paciente Barney Clark, quien sobrevivió durante 112 días. El corazón Jarvik-7 requería una fuente de poder externa que el paciente podía utilizar en una mochila.

| ***Corazón artificial Jarvik-7*** |
Corazón artificial implantado en un paciente llamado Barney Clark en 1982 que lo mantuvo vivo por 112 días.

Debido a los numerosos problemas (biocompatibilidad, fuentes de poder, destrucción de células sanguíneas y similares) asociados a los verdaderos corazones artificiales, el énfasis más importante de la investigación actual se enfoca en los ***dispositivos de asistencia ventricular (VAD)*** que ayudan a un corazón dañado a incrementar su funcionalidad y su rendimiento. En algunos diseños, el VAD se implanta directamente en el ventrículo izquierdo de un corazón dañado. Dentro de una jaula de titanio, un motor hace que un impulsor de titanio gire, incrementando así el torrente sanguíneo a través del corazón. En otros casos, el VAD se sitúa en la cavidad abdominal, jala la sangre del ventrículo izquierdo y luego la bombea directamente a la aorta, suplementando efectivamente el rendimiento del corazón.

| ***Dispositivos de asistencia ventricular (VAD)*** |
Dispositivos que ayudan a un corazón dañado a incrementar su funcionalidad y su rendimiento.

Los VAD externos se utilizan durante una cirugía de corazón abierto, pero los modelos implantados son vistos generalmente como puentes para trasplantar y son diseñados para permanecer en pacientes durante varios meses

mientras se localizan a los donadores de corazón. La FDA ha aprobado un VAD para implantación permanente en pacientes con enfermedades terminales que no pueden calificar para un trasplante, y la American Heart Association ha recomendado que los VAD se vuelvan medidas permanentes para pacientes con enfermedades del corazón en etapas avanzadas. Esto refleja el desarrollo en Europa, en donde el VAD Jarvik 2000 ha sido aprobado en la Unión Europea para su implante.

La piel proporciona la barrera para proteger a los órganos internos de los patógenos, mantiene el agua adentro y equivale a 15% del peso total del cuerpo humano. La piel está compuesta de dos distintas capas: la ***epidermis*** y la ***dermis***. La epidermis es la capa externa y no contiene células sanguíneas. En vez de esto, recibe nutrientes mediante difusión de la capa interna (***dermis***). Más de 90% de la epidermis está compuesta de ***queratinocitos***, células que contienen una gran cantidad de la proteína estructural dura ***queratina***. La resistencia de la piel está reforzada por la presencia de queratina junto con un par de otras proteínas estructurales: colágeno y ***elastina***. Conforme las células de la piel avanzan hacia arriba a través de la epidermis, cambian su forma y producen más queratina hasta que finalmente alcanzan la capa de la superficie. Esta dura capa de queratinocitos funciona como la principal barrera de humedad. Después de alrededor de 30 días, las células de la epidermis se secan y se caen del cuerpo para hacer espacio para el siguiente nivel a través del proceso llamado ***queratinización***. La capa más baja, la dermis, contiene un conjunto mucho más diverso de materiales, incluyendo vasos sanguíneos, glándulas sudoríparas, células nerviosas, folículos de pelo, glándulas sebáceas y músculos.

| ***Epidermis*** |
Capa externa de la piel que no contiene células sanguíneas pero recibe sus nutrientes de la difusión de la dermis.

| ***Dermis*** |
Capa interna de la piel que contiene vasos sanguíneos, glándulas sudoríparas, células nerviosas, folículos de cabello, glándulas sebáceas y músculos.

| ***Queratinocitos*** |
Células que comprenden 90% de la epidermis y contienen una gran cantidad de queratina.

| ***Queratina*** |
Proteína estructural dura contenida en los queratinocitos.

| ***Elastina*** |
Proteína estructural que refuerza la resistencia y capacidad de la piel al estiramiento.

| ***Queratinización*** |
Proceso en el que después de alrededor de 30 días, las células epidérmicas se secan y se caen del cuerpo para hacer espacio para el siguiente nivel de células.

La piel es mayormente autocurativa. El proceso de queratinización automáticamente repara el daño que no se extiende más allá de la epidermis, pero es necesario un mecanismo de curación más activo cuando el daño alcanza la dermis. El cuerpo responde al daño a la dermis al colocar nuevas fibras de colágeno a través del sitio herido. Las fibras proporcionan una matriz para el nuevo crecimiento de piel pero también resultan en la presencia de una cicatriz. El tejido dérmico nuevamente crecido soportará células epidérmicas y proporciona una barrera a la pérdida de agua y a la infección, pero los folículos de pelo y las glándulas sudoríparas no serán reemplazadas.

Cuando grandes segmentos de piel se dañan (por ejemplo, en el caso de víctimas quemadas), los sitios dañados son demasiado grandes como para que el cuerpo los repare por él mismo de una forma efectiva. Antes de 1986, las víctimas que sufrían quemaduras de tercer grado en más de 50% de su cuerpo era casi seguro que morían. Pero desde 1986, una piel artificial ha ofrecido nuevas esperanzas.

En lugar de basarse en el cuerpo para que establezca fibras de colágeno, se aplica una matriz sintética de fibras al área herida. La malla porosa proporciona un marco para el crecimiento de nuevas células de piel y reduce dramáticamente la cicatrización. En algunos casos una mezcla de fibras de colágeno de vaca y fibras de glicosaminoglicano (derivadas del cartílago de tiburón) se entretejen para proporcionar la matriz para el crecimiento de nuevas células dérmicas mientras que una malla más simple de polisiloxano soporta el crecimiento de las nuevas células epidérmicas. Estos suaves andamios imitan a los materiales biológicos naturales y capacitan a la piel para crecer sin las cicatrices asociadas con la red cristalina de colágeno natural fabricada por el cuerpo. Una vez que la capa ha sanado lo suficiente, ésta se puede reemplazar por injertos de piel de otras partes del cuerpo. La figura 9-13 muestra una comparación de las capas dérmicas y epidérmicas en la piel natural y la piel artificial.

En el pasado, los pacientes que experimentaban daños de vejiga, ya fuera por trauma o por cáncer de vejiga, eran forzados a tener una bolsa de colecta de orina externa y un pequeño orificio añadido a su cuerpo. Sin embargo,

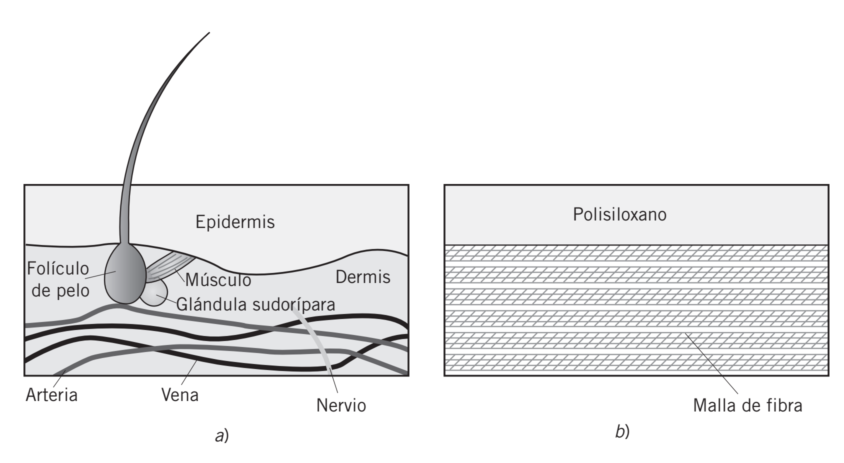


Figura 9-13 Comparación entre *a*) piel natural y *b*) piel artificial

la primer vejiga artificial exitosa fue hecha en 1999. A diferencia de muchos órganos artificiales, la vejiga artificial es un material biológico más que un biomaterial debido a que está hecho de una sección del propio intestino delgado del paciente. Los cirujanos ahora pueden remover aproximadamente tres pies de intestino delgado y darle la forma de una uva. El intestino reformado se pone de vuelta en el cuerpo y se conecta a la uretra y los riñones, funcionando así muy parecido a la vejiga original.

La investigación se lleva a cabo hacia biomateriales mejorados para reemplazar muchos otros órganos, incluyendo los ojos, los músculos y la laringe. Aunque quedan muchos retos, el campo de los biomateriales como reemplazos para órganos dañados ofrece grandes promesas para el futuro.

9.3.2 // Biomateriales funcionales en el apoyo de órganos funcionales

Muchos biomateriales se utilizan para aumentar el desempeño de órganos naturales funcionales en lugar de reemplazarlos. Aunque un sinfín de biomateriales encajan en esta amplia clasificación, las aplicaciones clave incluyen válvulas cardiacas mecánicas, sangre artificial, marcapasos e implantes de polímero para liberación controlada de fármacos.

| *Válvula mitral* | Válvula cardiaca que separa al ventrículo izquierdo del atrio izquierdo.

Cada una de las cuatro cámaras del corazón está servida por una válvula de chequeo que impide que la sangre se filtre de una cámara a otra, permite rangos de alto flujo sin añadir resistencia innecesaria al flujo y maneja la presión alta de la sangre que fluye. Como se muestra en la figura 9-14, la ***válvula mitral***

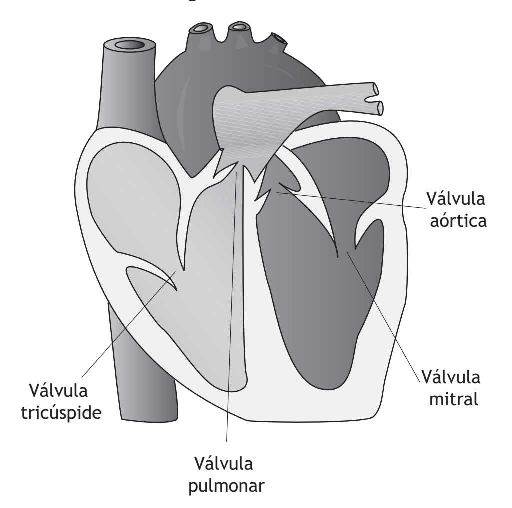


Figura 9-14 Esquema del corazón que muestra las cuatro válvulas

separa el ventrículo izquierdo y el atrio izquierdo del corazón, la ***válvula tricúspide*** separa el atrio derecho y el ventrículo derecho, la ***válvula pulmonar*** controla el flujo de la sangre hacia los pulmones y la ***válvula aórtica*** regula la entrada de la sangre oxigenada hacia el cuerpo.

Las válvulas cardiacas problemáticas experimentan uno de dos problemas: *regurgitación o estenosis*. La ***regurgitación*** sucede cuando la válvula falla al cerrar apropiadamente, permitiendo que algo de sangre se fugue de vuelta a la cámara anterior. Como resultado, el corazón debe trabajar más duro para bombear algo de la misma sangre dos veces. Cuando la fuga es grave, el corazón no puede compensar la eficiencia reducida y resulta en una falla cardiaca congestiva. La ***estenosis*** es un endurecimiento de la válvula que evita que se abra apropiadamente. Presiones sanguíneas altas se crean detrás de la válvula y el corazón debe trabajar más fuerte para mover la sangre a través del cuerpo, llevando a un incremento en el tamaño del corazón.

Las primeras válvulas artificiales fueron implantadas en 10 pacientes en 1952 por el doctor Charles Hufnagel. Seis de los 10 pacientes sobrevivieron la operación. Hufnagel utilizó una ***válvula de bola y jaula*** como la que se muestra en la figura 9-15, hecha de acrílico para reemplazar válvulas aórticas defectuosas. La bola original se hizo de caucho de silicón Silastic. Los pacientes que morían generalmente experimentaban una ***trombosis*** (coagulación de la sangre) en parte debido a la reacción del cuerpo al acrílico. Hoy en día, aproximadamente 70% de los receptores de válvulas artificiales sobreviven al menos durante cinco años después de la implantación.

El diseño de bola y jaula incluye un orificio a través del cual la sangre fluye y una serie de puntales metálicos que mantienen la bola en su lugar. El único diseño moderno de bola y jaula aprobado para su uso es la ***válvula de Starr-Edwards***, la cual utiliza un polímero de caucho de silicón impregnado con sulfato de bario como la bola, y una aleación de cobalto y cromo para los puntales de la jaula. La bola se mueve hacia el final de la jaula cuando se crea suficiente presión en el orificio, lo que permite el flujo en una dirección. Cuando se reduce la presión, la bola desciende de la jaula y llena el orificio previniendo la regurgitación.

Las ***válvulas de inclinación de disco***, como la que se muestra en la figura 9-16, tienen un disco circular sencillo que regula el flujo. La válvula de inclinación de disco más común, la ***válvula Hall de Medtronic***, está hecha de titanio con cuatro puntales regulando un disco plano cubierto de carbono, la cual puede inclinarse 75 grados para válvulas aórticas y válvulas mitrales. El orificio está hecho de carbono pirolítico y está cubierto de un anillo de poliéster sin costura. Los puntales de titanio soportan y guían al disco, el cual se abre durante el flujo, y luego se sella para prevenir la regurgitación. El diseño de esta válvula ha permanecido sin cambios importantes desde principios de los años ochenta.

La ***válvula bivalva de St. Jude*** ha sido implantada en más de 500 000 pacientes desde su primer uso en 1977. Esta válvula, figura 9-17, muestra dos hojas que se mueven aparte cuando la válvula está abierta y crean tres regiones de flujo separadas. La carcasa de la válvula es de carbono pirolítico depositado sobre grafito. Los dos guardiapivotes salen en el lado de la entrada para controlar la apertura y cierre de los opúsculos. El torrente sanguíneo a través de una válvula bivalva se acerca mucho más a las condiciones hemodinámicas de flujo a través de una válvula cardiaca normal.

Todas las válvulas cardiacas mecánicas pierden material a través del tiempo. Las pérdidas de erosión y friccionales impactan la superficie de la bola y la jaula, las bisagras de las válvulas bivalvas y la región de contacto entre los puntales y el disco en las válvulas de inclinación de disco. Dichas válvulas utilizan puntales de titanio y también son susceptibles a la falla por fatiga después del uso prolongado, pero éste no es un factor en las válvulas bivalvas hechas de grafito.

| *Válvula tricúspide* |
Válvula cardiaca que separa el atrio derecho del ventrículo derecho.

| *Válvula pulmonar* |
Válvula cardiaca que controla el flujo de sangre hacia los pulmones.

| *Válvula aórtica* |
Válvula cardiaca ubicada entre el ventrículo izquierdo y la aorta que regula la entrada de sangre oxigenada hacia el cuerpo.

| *Regurgitación* |
Sangre que se fuga de vuelta a la cámara anterior del corazón cuando una válvula falla al cerrar apropiadamente.

| *Estenosis* |
Endurecimiento de una válvula cardiaca que le impide abrir apropiadamente.

| *Válvula de bola y jaula* |
Válvula cardiaca artificial que utiliza una bola para sellar la válvula.

| *Trombosis* |
Coagulación de la sangre.

| *Válvula de Starr-Edwards* |
El único diseño de válvula de bola y jaula moderno aprobado para su uso por la FDA.

| *Válvulas de inclinación de disco* |
Válvulas cardiacas artificiales con un disco circular que regula el flujo de sangre.

| *Válvula Hall de Medtronic* |
Válvula de inclinación de disco más común utilizada como una válvula cardiaca artificial.

| *Válvula bivalva de St. Jude* |
Válvula cardiaca artificial que presenta dos hojas (discos semicirculares) que se mueven aparte cuando la válvula está abierta para crear tres regiones separadas de flujo.

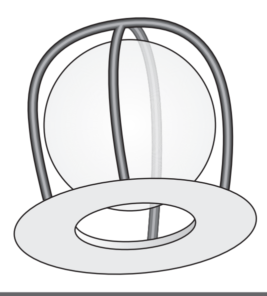


Figura 9-15 Válvula de bola y jaula

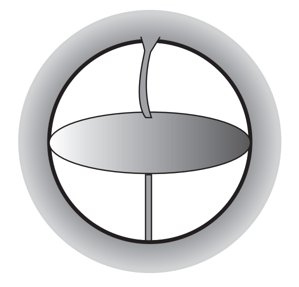


Figura 9-16 Válvula de inclinación de disco

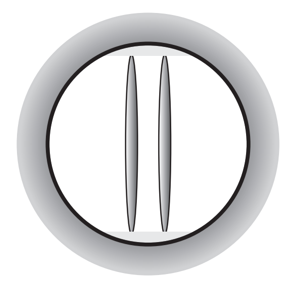


Figura 9-17 Válvula bivalva de St. Jude

La reducción en el área al momento que la sangre pasa a través de la válvula resulta en una caída en la presión. Debido a que el rango de flujo volumétrico (Q) de la sangre debe ser el mismo en ambos lados del orificio

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \tag{9.1}$$

o

$$v_2 = \frac{A_1 v_1}{A_2}, \tag{9.2}$$

en donde v es la velocidad de la sangre, 1 significa antes de la entrada de la válvula, 2 significa después de la entrada de la válvula y A es el área transversal del vaso. La ***ecuación de Bernoulli*** indica que

$$P_1 + \frac{\rho_1 v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho_2 v_2^2}{2}, \tag{9.3}$$

en donde P es la presión sanguínea y ρ es la densidad. La ecuación 9.3 se puede volver a escribir como

$$P_2 - P_1 = \frac{\rho_1 v_1^2}{2} - \frac{\rho_2 v_2^2}{2}, \tag{9.4}$$

lo que permite calcular la caída de la presión a través de la válvula.

El desempeño de una válvula cardiaca mecánica con frecuencia se estima mediante el ***área efectiva de orificio*** (EOA, por sus siglas en inglés), lo que mide la eficiencia de la válvula. Un EOA más alta significa una pérdida de energía menor debido al paso de la sangre a través de la válvula. La ecuación que define el EOA es

$$\text{EOA} = \frac{Q}{51.6\sqrt{P}}. \tag{9.5}$$

Debido a que la ecuación 9.5 no cuenta para el tamaño de la válvula, un término sin dimensiones llamado ***índice de desempeño*** (***PI***, por sus siglas en inglés) se calcula al dividir el área efectiva de orificio entre un estándar,

$$\text{PI} = \frac{\text{EOI}}{\text{EOI}_{\text{std}}} \tag{9.6}$$

El índice de desempeño proporciona una medida de efectividad que es independiente del tamaño de la válvula.

Las bajas de presión arterial muy grandes hacen que el músculo cardiaco trabaje más duramente y no son convenientes. Las válvulas de bola y jaula causan una baja de presión significativamente más grande que las válvulas de inclinación de disco o bivalvas. Sin embargo, las válvulas de bola y jaula experimentan casi ninguna regurgitación comparadas con las de inclinación de disco y las bivalvas, las cuales experimentan más.

Las tres válvulas mecánicas sujetan a la sangre a tensiones que inducen a la formación de coágulos de sangre (trombosis), así es que los pacientes que reciben las válvulas deben tomar anticoagulantes. Las altas tensiones cortantes y la formación de regiones en las que la sangre se puede estancar son las principales causas de la trombosis. El diseño de bola y jaula desarrolla altas tensiones a lo largo de las paredes de los puntales, mientras que el área de bisagras de las válvulas bivalvas tiene altas tensiones y estancamientos, haciendo común la formación de coágulos. Las válvulas de inclinación de disco desarrollan la mayoría de los coágulos detrás de los puntales.

| ***Ecuación de Bernoulli*** |
Una forma del equilibro de la energía mecánica relacionando una caída de presión con los cambios de densidad y velocidad dentro de un fluido.

| ***Área efectiva de orificio(EOA)*** |
Estimado que mide la eficiencia de una válvula.

| ***Índice de desempeño (PI)*** |
Término sin dimensiones que se calcula al dividir el área efectiva de orificio entre un estándar.

Debido a las complicaciones asociadas con las válvulas mecánicas, algunos doctores utilizan válvulas hechas de materiales biológicos. Estas válvulas vienen en tres formas fundamentales:

1. ***Homoinjertos.*** Válvulas cardiacas removidas de un cadáver y congeladas en nitrógeno líquido. Las válvulas son descongeladas e instaladas como un reemplazo directo en el cuerpo.
2. ***Autoinjertos.*** Los cirujanos remueven tejido de otras partes del cuerpo del paciente (por lo general el pericardio) y lo moldean alrededor de stents de acero inoxidable para formar nuevas válvulas.
3. ***Xenoinjertos.*** Los cirujanos implantan válvulas hechas de otras especies (generalmente cerdos pero también se han utilizado vacas). Éstas pueden ser válvulas cardiacas naturales o tejido pericárdico moldeado alrededor de stents.

| ***Homoinjertos*** |
Tejidos que, después de ser removidos de un cadáver y congelados en nitrógeno líquido, son descongelados e instalados como un reemplazo directo en el cuerpo.

| ***Autoinjertos*** |
Tejidos de reemplazo formados por la remoción de tejido de otras partes del cuerpo de un paciente que se moldean alrededor de un stent de acero inoxidable.

| ***Xenoinjertos*** |
Implantes de tejidos de otras especies.

Los homoinjertos ofrecen diversas ventajas claras. Debido a que son válvulas cardiacas naturales, casi no provocan coagulaciones y no requieren del uso de anticoagulantes. Sus propiedades hemodinámicas son mucho más superiores que las válvulas mecánicas. Sin embargo, la provisión de donadores de válvulas está limitada. Las válvulas deben ser del tamaño adecuado y ser compatibles para trasplante. El receptor debe tomar inmunosupresores para prevenir el rechazo, y la técnica quirúrgica para implantar la válvula de reemplazo es difícil y peligrosa.

Los autoinjertos ofrecen la ventaja de no desencadenar una respuesta inmune debido a que se utiliza el propio tejido del paciente. Sin embargo, el material utilizado para hacer autoinjertos no está diseñado específicamente para funcionar como válvula, por lo que la eficiencia es con frecuencia menor que con los homoinjertos o las válvulas mecánicas.

Los xenoinjertos por lo general involucran enroscar un cilindro de polipropileno hueco a través de la válvula porcina y utilizar un stent de aleación de cobalto y cromo dentro del cilindro para mantener la integridad estructural. Las válvulas porcinas están más disponibles que las de los donadores humanos, y la cirugía de implantación no es tan compleja como la de las válvulas artificiales. Los pacientes deben tomar inmunosupresores después de los xenoinjertos. Los xenoinjertos ofrecen propiedades hemodinámicas entre las válvulas mecánicas y los homoinjertos.

La sangre tiene muchos propósitos dentro del cuerpo, pero sus funciones primarias involucran la transportación del oxígeno a las células del cuerpo y el transporte de productos de desperdicio lejos de las células del cuerpo. La sangre consiste de un fluido amarillo llamado ***plasma*** que forma 60% del volumen total y de los ***corpúsculos*** (células sanguíneas blancas, células sanguíneas rojas y plaquetas) que compone el otro 40%. Los corpúsculos son producidos en la médula ósea y son reemplazados continuamente. Sin embargo, cuando un traumatismo o una enfermedad provoca una deficiencia aguda de células sanguíneas rojas, se requiere de una transfusión sanguínea.

| ***Plasma*** |
Fluido amarillo que forma 60% del volumen total de la sangre.

| ***Corpúsculos*** |
Células sanguíneas blancas, células sanguíneas rojas y plaquetas en el torrente sanguíneo.

La fuente más común de sangre de reemplazo viene de los donadores. La Cruz Roja Americana y los bancos de sangre regionales rutinariamente solicitan donaciones de sangre del público, y la sangre donada se puede guardar hasta por 42 días antes de su transfusión. Sin embargo, en emergencias agudas, la demanda de sangre generalmente excede la provisión, en especial debido a que la presencia de antígenos en las células sanguíneas rojas limita la compatibilidad de la sangre de persona a persona.

La mayor necesidad de un paciente que ha experimentado pérdida de sangre sustancial es obtener oxígeno para las células del cuerpo. Normalmente, las células sanguíneas rojas desempeñan esta función debido a la presencia

| ***Hemoglobina*** |
Proteína que contiene hierro que proporciona el oxígeno a las células del cuerpo.

de una proteína que contiene hierro llamada ***hemoglobina***. Cuatro moléculas de oxígeno se adjuntan a cada molécula de hemoglobina mientras la sangre está en los pulmones, en donde la presión parcial del oxígeno es alta. Mientras las células rojas viajan a través del cuerpo, la presión parcial más baja de oxígeno desencadena la liberación gradual de las moléculas de oxígeno. Una sangre artificial (más apropiadamente llamada ***oxigenoterapia***) capaz de absorber el oxígeno de los pulmones y liberarlo de forma gradual a través del cuerpo tendría un gran valor médico.

| ***Oxigenoterapia*** |
Sangre artificial capaz de absorber oxígeno de los pulmones y liberarlo a través del cuerpo.

La búsqueda de sangre artificial ha llevado a dos tecnologías competitivas, aunque actualmente ninguna está aprobada para su uso médico en Estados Unidos. La primer técnica involucra el uso de perfluorocarbonos (PFC), moléculas orgánicas que tienen hidrógeno de sustitución de flúor en diversas ubicaciones. El oxígeno es casi 100 veces más soluble en los PFC que en el plasma sanguíneo regular, así es que teóricamente una solución de PFC debe ser capaz de sostener la vida del paciente hasta que sea posible una transfusión de sangre normal. Una empresa japonesa intentó ensayos clínicos con una emulsión de PFC como sangre artificial, pero los resultados no fueron tan efectivos como se esperaba. La tecnología más nueva utilizando moléculas de PFC más pequeñas que desarrolle emulsiones más estables es prometedora.

La técnica alternativa involucra la extracción de la hemoglobina de los productos sanguíneos que han pasado su vida útil de 42 días y después serían descartados. La idea de utilizar la hemoglobina en una solución diluida que fluiría fácilmente ha estado rondado durante décadas, pero los ensayos iniciales fueron desastrosos. La inyección directa de hemoglobina libre hacia el torrente sanguíneo provocó que los capilares se colapsaran, y en consecuencia, cortaran la provisión de sangre hacia las células. En adición a la unión del oxígeno, la hemoglobina libre es capaz de enlazar las moléculas de óxido nitroso que ayudan a mantener los vasos sanguíneos abiertos. La molécula de hemoglobina debe tratarse a través de la encapsulación, el entrecruzamiento y la polimerización para que ésta se acerque a las propiedades de transportación de oxígeno que despliega como parte de una célula sanguínea roja.

| ***PolyHeme*** |
Sustituto de sangre mejorado basado en hemoglobina sobre el que la Food and Drug Administration inició ensayos clínicos a finales de 2003.

A finales de 2003 la FDA comenzó ensayos clínicos sobre un sustituto de sangre mejorado basado en hemoglobina llamado ***PolyHeme***. Este nuevo producto restaura los niveles de hemoglobina en el torrente sanguíneo, y puede ser transfundida a todos los pacientes sin importar el tipo de sangre y permanece útil durante al menos 12 meses. El producto de los Laboratorios Northfield está esperando la aprobación final de la FDA.

| ***Marcapasos artificiales*** |
Pequeños dispositivos implantados en el corazón que, al sentir un latido cardiaco irregular, mandan una señal eléctrica para hacer que el corazón lata con normalidad.

| ***Nódulo sinusal*** |
Racimo de células que generan una señal eléctrica que controlan los latidos dentro de un corazón normal.

| ***Bradicardia*** |
Latido irregular del corazón que puede causar complicaciones tan graves como la muerte.

Los ***marcapasos artificiales*** son una de las más funcionales aplicaciones biomateriales. En un corazón normal, los latidos son controlados por el ***nódulo sinusal***, el cual provoca que el corazón lata de 60 a 80 veces por minuto (alrededor de 100 000 veces al día) y a rangos más altos durante el ejercicio. Cuando el nódulo sinusal funciona mal o las señales eléctricas generadas por el nódulo no pueden alcanzar al corazón, resulta un ritmo cardíaco irregular llamado ***bradicardia*** y puede causar complicaciones tan graves como la muerte.

Un marcapasos artificial es un pequeño dispositivo implantado directamente en el corazón. Una cubierta de titanio biocompatible alberga una batería de larga duración, un microprocesador y un cabezal con pequeños cables conectados directamente al atrio derecho, al ventrículo derecho o a ambos. Cuando el microprocesador siente un latido irregular, envía una señal eléctrica a través de los cables provocando que el corazón lata normalmente. Más de 2 250 000 marcapasos se han implantado en pacientes en Estados Unidos desde 1958.

| ***Agentes de liberación controlada*** |
Sistemas implantados en el cuerpo que gradualmente liberan un producto farmacéutico a una dosis prescrita.

Los ***agentes de liberación controlada*** para la entrega de fármacos son los últimos biomateriales funcionales que se comentan en este capítulo. Tradicionalmente, la mayoría de los productos farmacéuticos se ingieren vía oral o se inyectan hacia el torrente sanguíneo con una jeringa hipodérmica. Sin

embargo, estos métodos de entrega de fármacos ofrecen diversas limitaciones específicas. Primero, la dosis es difícil de controlar. Todo el fármaco se da en una parte, lo que significa que la concentración inicial es más alta que la óptima y gradualmente declina. Además, el fármaco debe transportarse a través del cuerpo hasta el sitio deseado.

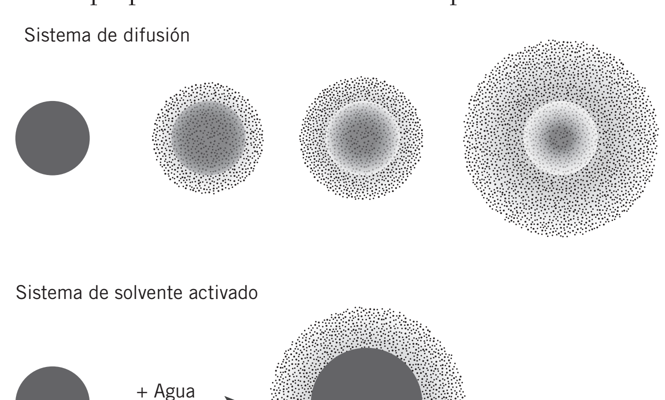
Los sistemas de liberación controlada que proporcionan el fármaco en una forma que permita la liberación continua del nivel de dosificación óptima, ofrecen ventajas significativas. Los sistemas entran dentro de tres categorías principales:

1. *Sistemas de difusión*. El fármaco es suspendido en una matriz de polímero o encapsulado en una membrana y gradualmente se difunde.
2. *Sistemas de solventes activados*. Un implante inicialmente seco absorbe el agua, provocando que la matriz o la membrana se hinchen. La presión osmótica guía al fármaco hacia el cuerpo a un rango controlado.
3. *Sistemas de degradación de polímeros*. Como en los sistemas de difusión, el fármaco es albergado en una matriz o membrana polimérica, pero aquí el polímero se degrada gradualmente permitiendo que el fármaco escape.

La figura 9-18 ilustra el típico tiempo de liberación de un producto farmacéutico a través de cada sistema de liberación controlada.

Una de las primeras aplicaciones de los sistemas de degradación de polímeros data de 1986, cuando un copolímero de estireno-hidroximetacrilato se utilizó para encapsular la insulina y la vasopresina, dos fármacos por lo general inyectados directamente en el torrente sanguíneo. El copolímero protegía los fármacos de la digestión en el estómago y podía soportar el bajo pH de los ácidos estomacales, pero las enzimas bacteriales en los intestinos poco a poco erosionaron al polímero para liberar los fármacos en la región deseada del cuerpo.

Los sistemas poliméricos ofrecen otras diversas ventajas. Los enlaces peptídicos que pueden controlar en donde el polímero es absorbido en el cuerpo pueden ser anexados a la superficie de los materiales poliméricos.



Sistema de degradación de polímero

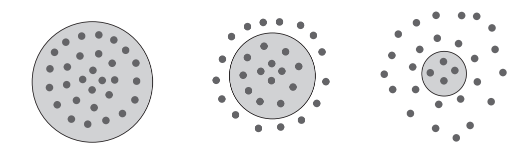


Figura 9-18 Liberación controlada de un fármaco

La investigación relevante se ha enfocado en el uso de agentes de liberación controlada para proporcionar medicaciones contra el cáncer directamente en el sitio de los tumores.

Otro ejemplo específico de liberación controlada involucra implantes oculares para liberar el fármaco pilocarpina, el cual reduce la presión en los ojos de los pacientes con glaucoma. Un implante consistente de pilocarpina colocada entre dos membranas delgadas y transparentes hechas de copolímero de acetato de etileno-vinilo se coloca directamente en el ojo, muy parecido a los lentes de contacto. Las lágrimas producidas en el ojo difunden y disuelven la pilocarpina a través de la membrana, la cual es liberada a un rango consistente durante siete días. Después de siete días, la membrana vacía se remueve y se inserta una nueva en su lugar.

Una variedad de polímeros se utilizan en las aplicaciones de liberación controlada. El acetato de vinilo es el más seleccionado debido a que su permeabilidad es fácil de regular. Los poliuretanos proporcionan elasticidad; el polietileno no se hincha y añade resistencia a la matriz o membrana. Los metilmetacrilatos son transparentes y fuertes, y el alcohol de polivinilo tiene una fuerte afinidad con el agua.

No todos los agentes de liberación controlada deben ser implantados o ingeridos. Una de las más grandes aplicaciones comerciales de liberación controlada es el parche de nicotina, el cual se usa en los brazos de los individuos que están tratando de dejar de fumar. Más de 35 parches transdérmicos han sido aprobados por la FDA para un rango de aplicaciones, incluyendo la contracepción y la prevención de mareos. Un parche transdérmico contiene cinco partes principales:

1. *Revestimiento*. Protege al parche durante el embarque. Es removido y desechado antes del uso.
2. *Adhesivo*. Mantiene el parche junto y lo pega a la piel. En los parches más simples, el adhesivo también sirve como la matriz que alberga al fármaco.
3. *Fármaco*. El producto diseñado para ser entregado a rangos controlados. Es generalmente guardado dentro del parche, aunque puede ser distribuido dentro del adhesivo.
4. *Membrana*. Controla la liberación del fármaco a través de la reserva.
5. *Material de refuerzo*. Protege al parche de daños mientras se encuentra en la piel.

Los procesos de difusión para los agentes de liberación controlada transdérmicos son más complejos debido a que el fármaco debe difundirse a través del parche y hacia la piel.

¿Cuáles cuestiones éticas son únicas para los biomateriales?



9.4 ÉTICA Y BIOMATERIALES

Las cuestiones éticas que surgen del uso de los biomateriales forman una legión. El costo, la justicia, el acceso y la seguridad toman relevancia incrementada cuando la vida de un ser humano en específico está en juego. ¿Qué tantas pruebas son suficientes? Si se hacen muy pocas pruebas, un producto potencialmente dañino podría ser puesto en el mercado. Sin embargo, pruebas adicionales requieren tanto tiempo (retrasando la introduc-

ción del producto y costeando a usuarios potenciales el acceso al mismo) como dinero (incrementando el costo del producto final cuando se aprueba).

Muchas de las aplicaciones para los biomateriales comentadas en este capítulo tienen el potencial de prolongar la vida y/o mejorar la calidad de vida para muchas personas pero, ¿cómo determinar quién tiene acceso a estos productos?, ¿necesidad?, ¿capacidad de pago?, ¿edad?, ¿salud general?, ¿causa del problema?, ¿valor a la sociedad?

Las cuestiones que involucran se han vuelto tan complejas que un campo entero llamado ***bioética*** se ha creado para lidiar con estos dilemas éticos. Los bioéticos no son contratados debido a sus opiniones personales sino por su entendimiento de la historia y la investigación en el campo. Existen retos particulares para los bioéticos religiosos, quienes deben equilibrar los avances científicos con las doctrinas religiosas. Esta situación se vuelve en particular importante en las civilizaciones no occidentales en donde la religión no está tan claramente separada del gobierno o de la investigación científica como lo está en el Oeste.

| ***Bioética*** |
Campo de estudios que examina las repercusiones morales, profesionales y legales de los avances en la biología y la medicina.

Resumen del capítulo 9

En este capítulo:

- Se distinguió entre materiales biológicos, biomateriales, materiales biobasados y materiales biomiméticos.
- Se clasificaron los biomateriales y los materiales biológicos como estructurales o funcionales.
- Aprendió acerca del hueso (material biológico) y la hidroxiapatita (material biomimético).
- Se revisaron diversas aplicaciones de biomateriales estructurales incluyendo las caderas artificiales, stents vasculares, catéteres, implantes de senos, prótesis de extremidades, amalgamas y compuestos dentales.
- Se revisaron órganos artificiales incluyendo corazones (dispositivos de asistencia ventricular), riñones (hemodiálisis), piel y vejigas.
- Se consideró el uso de otros biomateriales funcionales incluyendo las válvulas cardiacas mecánicas, sangre artificial (oxigenoterapia), marcapasos y agentes de liberación controlada para la entrega de fármacos.
- Se analizaron las cuestiones de la bioética.



Términos clave

agentes de liberación controlada *p. 292*
amalgama de alto cobre *p. 284*
amalgama de fase gamma 2 *p. 284*
amalgamas *p. 284*
angioplastía de balón *p. 280*
área efectiva de orificio (EOA) *p. 290*
autoinjertos *p. 291*
biocerámicos *p. 277*
biocompatibilidad *p. 275*
bioética *p. 295*
biomateriales *p. 274*
biomateriales estructurales *p. 275*
biomateriales funcionales *p. 275*
biotecnología *p. 274*
bradicardia *p. 292*
brazos mioeléctricos *p. 280*
cabezas femorales Y-TZP *p. 277*
catéter de Foley *p. 281*
catéteres *p. 281*
cavidad del acetábulo *p. 277*
células de alineación ósea *p. 276*
cemento *p. 283*
colágeno *p. 275*
compuestos dentales *p. 284*
contractura capsular *p. 282*
corazón artificial Jarvik-7 *p.v286*
corpúsculos *p. 291*
dahlite *p. 283*
dentina *p. 283*
dermis *p. 287*
diálisis *p. 285*

Problemas de tarea

1. Explique por qué la mayoría de las prótesis de extremidades no se flexionan en el tobillo sino sólo las diseñadas para atletas.
2. $ Compare y contraste las ventajas y desventajas de los rellenos hechos de compuestos dentales con los hechos de amalgamas.
3. Describa la diferencia entre los biomateriales funcionales y estructurales.
4. Compare el diseño y el mecanismo operacional de las válvulas de bola y jaula, válvulas de inclinación de disco y las válvulas bivalvas de St. Jude.
5. ¿Por qué no existe una prueba sencilla para la biocompatibilidad?
6. Explique tres mecanismos básicos para la liberación controlada de fármacos.
7. Describa los roles de los osteoblastos y los osteoclastos en la reformación de los huesos.
8. ¿Por qué el titanio es un biomaterial tan comúnmente utilizado?
9. ¿Cuál es el propósito de cubrir algunos biomateriales con carbono pirolítico?
10. ¿Por qué la hemoglobina pura no se inyecta en el torrente sanguíneo de los pacientes que necesitan transfusión?
11. ¿La sangre artificial realmente desempeña todas las funciones de la sangre? Si no, ¿cuál es su función principal y por qué no desempeña otras?
12. ¿Cuál es la ventaja de utilizar una red cristalina biocompatible en el caso de los daños a la piel?
13. Compare y contraste el rol de la dermis y la epidermis, y comente cómo estos roles impactan la selección de los materiales para la piel artificial.
14. Comente las propiedades mecánicas que regulan la selección y el diseño del material de la quilla en las extremidades artificiales.
15. Explique el propósito de las cuatro válvulas cardiacas.
16. Explique la ventaja de los stents de nitinol sobre aquellos hechos de acero inoxidable.
17. Clasifique los elementos listados como bioma-

teriales, materiales biológicos, materiales biobasados o materiales biomiméticos.
a) hidroxiapatita
b) hueso
c) conchas de mar usadas como agregados en concreto
d) nitinol usado en un stent vascular

18. Calcule el porcentaje de caída de presión a través de una arteria parcialmente bloqueada si la sección saludable de la arteria es de 0.5 cm de diámetro y el bloqueo reduce el área en 30%.

19. Explique el principio operacional de la hemodiálisis.

20. ¿Por qué la mayoría de los biomateriales no son reutilizados o reciclados?

21. Compare y contraste los implantes de senos de gel de silicón, de oso gummy y salinos.

22. ¿Por qué los dispositivos de asistencia ventricular (VAD) se utilizan en lugar de los corazones artificiales?

23. Describa la función de un marcapasos y explique cómo se seleccionan los materiales con los que se construye.

24. ¿Qué propiedades de los materiales son un factor dentro de la selección para el reemplazo de acetábulo en las caderas artificiales?

25. ¿Por qué las cabezas femorales Y-TZP están ganando popularidad?

26. ¿Por qué el costo es un factor más grande en cuanto a la selección de materiales para membranas de diálisis que en cuanto a la construcción de extremidades artificiales?

27. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de utilizar válvulas cardiacas mecánicas en vez de las hechas de materiales biológicos?

28. Describa cómo las preocupaciones materiales que impactan en la selección de una membrana para la hemodiálisis son diferentes de aquéllas para una membrana utilizada en un parche transdérmico.

29. ¿Por qué el índice de desempeño es utilizado para medir la eficiencia de las válvulas cardiacas?

30. ¿Por qué un dentista debe perforar el esmalte adicional al prepararse para rellenar una cavidad?

31. Explique los roles del colágeno en la reparación de la piel y la formación de huesos.

32. ¿Cómo impacta la ley de Wolf la esperanza de vida de las caderas artificiales?

33. ¿Qué ventajas ofrecen los agentes de liberación controlada sobre la inyección de fármacos mediante una jeringa?

34. ¿Por qué los ojos artificiales son mucho más difíciles de desarrollar que otros órganos artificiales?

35. Explique el proceso de queratinización.

36. Describa las distintas capas de los dientes y las propiedades de los biomateriales que hacen las dos capas exteriores.

37. Compare y contraste los autoinjertos, los homoinjertos y los xenoinjertos.

Apéndice A
Principales productores de metales y polímeros

Tabla A-1 Principales productores de aluminio para uso doméstico

Nombre de la compañía	*Estado*	*Principales productos*	*Sitio web*
Alcan, Inc.	Montreal	Bauxita y alúmina, metal primario, productos de ingeniería y embalaje	www.alcan.com
Alcoa, Inc.	Pennsylvania	Lingotes, alúmina, embalaje, productos para la construcción	www.alcoa.com
Century Aluminium Company	California	Aluminio fundido, lingotes, lingotes pequeños y regueras	www.centuryca.com
Columbia Falls Aluminium Company	Montana	Aluminio y mineral de aluminio a grado de fundición	www.cfaluminium.com
Noranda Aluminum, Inc.	Missouri	Aluminio en barra, lingote pequeño, lingote de fundición y regueras primarias	www.norandaaluminum.com
Ormet Corporation	Ohio	Aluminio en hoja, lingote, alúmina a grado de fundición	www.ormet.com

Tabla A-2 Los 10 productores de oro más importantes en el mundo en 2007

Rango	*Nombre de la compañía*	*País*	*Producción de oro (miles de onzas)*	*Sitio web*
1	Barrick Gold	Canadá	2 964	www.barrick.com
2	Newmont Mining	EUA	2 362	www.newmont.com
3	Rio Tinto	RU	681	www.riotinto.com
4	Kinross Gold	Canadá	627	www.kinross.com
5	Anglogold Ashanti	Sudáfrica	189	www.anglogold.com
6	Sumitomo Metal Mining	Japón	133	www.smm.co.jp
7	Quadra Mining	Canadá	108	www.quadramining.com
8	Teck Cominco	Canadá	104	www.teckcominco.com
9	Goldcorp	Canadá	94	www.goldcorp.com
10	Golden Cycle	EUA	93	www.goldencycle.com

Datos de National Mining Association www.nma.org

Tabla A-3 Los 10 productores de plata más importantes en el mundo en 2007

Rango	*Nombre de la compañía*	*País*	*Producción de oro (millones de onzas)*	*Sitio web*
1	BHP Billiton	Australia	45.7	www.bnpbilliton.com
2	Industrias Peñoles	México	44.5	www.penoles.com.mx
3	KGHM Polska Miedz	Polonia	39.1	www.kghm.pl
4	Cía. Minera Volcán	Perú	21.1	www.volcan.com.pe
5	Khazakmys	Khazakstan	19.0	www.khazakmys.com
6	Pan American Silver	Canadá	17.1	www.panamericansilver.com
7	Goldcorp	Canadá	17.0	www.goldcorp.com
8	Cía. de Minas Buenaventura	Perú	16.0	www.buenaventura.com
9	Polymetal	Rusia	15.9	en.polymetal.ru
10	Southern Cooper Company	EUA	15.2	www.southerncopper.com

Datos de Silver Institute, www.silverinstitute.org

Tabla A-4 Los 10 productores de acero más importantes en el mundo en 2007

Rango	*Nombre de la compañía*	*País*	*Producción de acero crudo (millones de toneladas métricas)*	*Sitio web*
1	Arcelor Mittal	Luxemburgo	116.4	www.arcelormittal.com
2	Nippon Steel	Japón	35.7	www.nsc.co.jp
3	JFE	Japón	34.0	www.JFE-steel.co.jp
4	Posco	Corea	31.1	www.posco.com
5	Baosteel	China	28.6	www.baosteel.com
6	Tata Steel	India	26.5	www.tatasteel.com
7	Anshan-Benxi	China	23.6	www.anbensteel.net
8	Jian-Su Shagang	China	22.9	www.huaigang.com
9	Tangshan	China	22.8	www.tangsteel.com
10	U.S. Steel	EUA	21.5	www.ussteel.com

Datos de International Iron and Steel Institute, www.worldsteel.org

TABLA A-5 Los 10 productores de estaño más importantes en el mundo en 2007*

Rango	*Nombre de la compañía*	*País*	*Producción de estaño (miles de toneladas métricas)*	*Sitio web*
1	Yunnan Tin	China	61.1	www.ytl.com.cn
2	PT Timah	Indonesia	58.3	www.timah.com
3	Minsur	Perú	35.9	www.JFE-steel.co.jp
4	Malaysia Smelting Corporation	Malasia	25.5	www.minsur.com.pe
5	Thaisarco	Tailandia	19.8	www.thaisarco.com
6	Yunnan Chengfeng	China	18.0	en.yhtin.com
7	Liuzhou China Tin	China	13.2	n/d
8	EM Vinto	Bolivia	9.4	Nacionalizada en 2007
9	Metallo Chimique	Bélgica	8.4	www.metallo.com
10	Gold Bell Group	China	8.0	www.shjzong.com

*Observe que desde 1983 no se extrae o funde estaño en Estados Unidos.
Datos de ITRI (antes Tin Research Council). www.itri.co.uk

TABLA A-6 Los mayores abastecedores de dióxido de titanio a nivel mundial

Nombre de la compañía	*País*	*Sitio web*
DuPont	EUA	www.dupont.com
Huntsman Tioxide Europe	RU	www.huntsman.com
Ishihara Sangyo Kaisha	Japón	www.iskweb.co.jp
Kronos Worldwide Inc.	Bélgica	www.kronostio2.com
Millenium Chemicals	RU	www.milleniumchem.com
Precheza	República Checa	www.precheza.cz
Sachtleben Chemie	Alemania	www.sachtleben.de
Tayca	Japón	www.tayca.co.jp
Tronox Pigments	Países Bajos	www.tronox.com

Tabla A-7 Productores y nombres comerciales de polímeros más importantes*

Polímero	*Nombre comercial*	*Nombre de la compañía*	*Sitio web*
Poli-p-fenileno benzobisoxazol (PBO)	Zylon	Toyobo	www.toyobo.co.jp
Policloropreno	Neoprene	DuPont	www.dupont.com
Polietileno (PE)	Alathon Chemplex Dylan Marlex Paxon Rexene Tyvek Unival	Lyondellbasell Chemplex Sinclair Koppers Chevron Phillips ExxonMobil Chemical Huntsman DuPont Dow Chemical	www.lyondell.com www.chemplex.com www.koppers.com www.cpchem.com www.exxonmobil.com www.huntsman.com www.dupont.com www.dow.com
Polietileno tereftalato (PET)	Dacron Diolen Mylar Polyclear	Invista Diolen Dupont Teijin Polyclear	www.invista.com www.diolen.com www.dupontteijinfilms.com www.polyclear.com.uk
Polimetilmetacrilato (PMMA)	Acrylex Lucite Oroglass Plexiglas	Acrylex Lucite Rohm and Haas Atoglas	n/d www.lucite.com www.rohmhaas.com www.plexiglas.com
Polipropileno (PP)	Marlex Moplen Norchem Profax Tenite	Chevron Phillips Lyondellbasell Quantum Chemical Lyondellbasell Eastman	www.cpchem.com www.lyondell.com www.quantum.com www.lyondell.com www.eastman.com
Politereftalamida de p-fenileno (PPTA)	Kevlar Twaron	Dupont Teijin	www.dupont.com
Poliestireno (PS)	Styron Lustrex	Dow Chemical Monsanto	www.dow.com www.monsanto.com
Politetrafloroetileno (PTFE)	Teflon	Dupont	www.dupont.com
Cloruro de polivinilideno (PVDC)	Saran	Dow Chemical	www.dow.com
Rayón	Bemberg Danufil Tencel Viloft	Asahi-Kasei Kelheim Fibres Lenzing Fibers Kelheim Fibres	www.asahi-kasei.jp.com www.kelheim-fibres.com www.lenzing.com www.kelheim-fibres.com
Spandex	Dorlacren Lycra	Bayer Invista	www.bayer.com www.invista.com

*Nota: esta lista es sólo representativa.

Apéndice B
Propiedades de metales y aleaciones principales

Los datos son de una variedad de fuentes incluyendo a:

Robert C. Weast y Melvin J. Astle, eds., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 63a edición (Boca Raton, FL: CRC Press Inc., 1982)

Matweb: La base de datos de propiedades de los materials: www.matweb.com

Observe que las propiedades de los materiales varían con el contenido químico exacto y las condiciones del proceso. Los valores presentados en el apéndice son representativos de los materiales a través de un espectro de temperaturas y condiciones de ensayo. Los datos del fabricante se deben usar para fines de diseño.

Tabla B-1 Propiedades de los metales puros

Material	*Densidad (g/cm^3)*	*Resistencia a la tracción (MPa)*	*Temperatura de fusión (°C)*	*Conductividad térmica $\frac{w}{(mK)}$*
Aluminio	2.6989	45	660.37	210
Antimonio	6.618	11.4	630.74	18.6
Cadmio	8.64	75	321	92
Calcio, laminado	1.54	110	841	126
Calcio, recocido	1.54	40	841	126
Cerio	6.70	100	795	109
Cromo	7.19	413	1860	69.1
Cobalto	8.80	225	1493	69.21
Cobre, recocido	8.96	210	1083.2	385
Cobre, trefilado en frío	8.96	344	1083.2	385
Disprosio	8.54	246	1409	10
Erbio	9.05	136	1522	9.6
Gadolinio	7.89	190	1310	8.8
Oro	19.32	120	1 064.43	301
Hafnio	13.31	485	2207	22
Holmio	8.80	259	1470	16.2
Iridio	7.31	4.50	156.61	83.7
Hierro	7.87	540	1535	76.2
Lantano	6.166	130	915	14
Plomo	11.34	18	327.5	33
Litio	0.53	15	180.54	71.2
Lutecio	9.84	140	1651	16.4
Magnesio, fundición en arena	1.74	90	648.3	159

(*Continúa*)

TABLA B-1 Propiedades de los metales puros (*continuación*)

Material	*Densidad* (g/cm^3)	*Resistencia a la tracción (MPa)*	*Temperatura de fusión (°C)*	*Conductividad térmica* $\frac{w}{(mK)}$
Manganeso	7.44	496	1 244	8
Mercurio	13.546	n/d	−38.87	8.50
Molibdeno, recocido	10.22	324	2 617	138
Molibdeno, recristalizado	10.22	324	2 617	138
Neodimio	7.01	170	1 010	13
Níquel	8.88	317	1 455	60.7
Niobio	8.60	585	2 468	52.3
Osmio	22.5	1 000	3 050	91.67
Paladio	12.02	180	1 552	71.2
Platino	21.45	165	1 769	69.1
Plutonio	19.0	400	640	8.4
Potasio	0.860	n/d	63.25	99.2
Praseodimio	6.77	100	927	11.7
Prometio	7.264	160	1 042	17.9
Renio	21.03	2 100	3 180	39.6
Rodio	12.4	700	1 960	151
Rutenio	12.3	540	2 310	116
Samario	7.54	120	1 067	13.3
Escandio	3.0	255	1 539	6.3
Selenio	4.81	n/d	220	Asimétrico: 1.31 paralelo al eje *c*; 4.52 perpendicular al eje *c*
Plata	10.491	140	961.93	419
Sodio	0.971	10	97.8	135
Tantalio	16.6	345	2 890	59.4
Tecnecio	11.5	1 510	2 200	50.6
Telurio	6.23	11	449.5	Asimétrico: 3.38 paralelo al eje *c*; 1.97 perpendicular al eje *c*.
Terbio	8.27	140	1 356	11.1
Talio	11.85	7.5	304	39.4
Torio	11.3	200	1 800	37.7
Tulio	9.33	140	1 530	16.9
Estaño	5.765	220	231.968	63.2
Titanio	4.50	220	1 650	17.0
Tungsteno	19.3	980	3 370	163.3
Uranio	19.07	400	1 132.3	26.8
Vanadio	6.11	911	1 735	31.0
Iterbio	6.98	72	824	34.9
Itrio	4.472	150	1 515	14.6
Zinc	7.10	37	419.58	112.2
Zirconio	6.53	330	1 852	16.7

Tabla B-2 Aleaciones de aluminio

Especificación de la aleación	*Densidad (g/cm^3)*	*Dureza Brinnel*	*Resistencia a la tracción (Mpa)*	*Límite elástico (Mpa)*	*Resistencia a la conformación (Gpa)*	*Conductividad térmica $\frac{w}{(mK)}$*
1190-O	2.70	12	45	10	62.0	243
1199-H18	2.70	31	115	110	62.0	240
2011-T3	2.83	95	379	296	70.3	151
2014-O	2.80	45	186	96.5	72.4	193
2017-O	2.79	45	179	68.9	72.4	193
2024-O	2.78	47	186	75.8	73.1	193
2024-T3	2.78	120	483	345	73.1	121
2024-T6	2.78	48	427	345	72.4	151
2090-O	2.59	57	210	190	76.0	88
2090-T3	2.59	86	320	210	76.0	88
2219-O	2.84	46	172	75.8	73.1	171
2219-T31	2.84	100	359	248	73.1	112
2219-T87	2.84	130	476	393	73.1	121
3003-O	2.73	28	110	41.4	68.9	193
3003-H12	2.73	35	131	124	68.9	163
3003-H18	2.73	55	200	186	68.9	154
3004-O	2.72	45	179	68.9	68.9	163
3004-H18	2.73	65	240	225	69.0	160
4043-O	2.69	39	145	70	69.0	163
5005-O	2.70	28	124	41.4	68.9	200
5005-H12	2.70	38	138	131	68.9	200
5005-H38	2.70	51	200	186	68.9	200
5050-O	2.69	36	145	55.2	68.9	193
5050-H38	2.69	63	221	200	68.9	193
5052-O	2.68	47	193	89.6	70.3	138
5052-H38	2.68	77	290	255	70.3	138
5154-O	2.66	58	241	117	70.3	125
5154-H38	2.66	80	331	269	70.3	125
5454-O	2.69	62	248	117	70.3	134
5454-H34	2.69	81	303	241	70.3	134
6053-O	2.69	26	110	55	69.0	171
6053-T6	2.69	80	255	220	69.0	163
6061-O	2.70	30	124	55.2	68.9	180
6061-T8	2.70	120	310	276	69.0	170
6463-O	2.69	25	90	50	69.0	200
6463-T6	2.69	74	241	214	68.9	200
7005-O	2.78	53	198	80	72.0	166
7005-W	2.78	93	345	205	72.0	140
7005-T53	2.78	105	390	345	72.0	148

Tabla B-3 Aleaciones de aluminio

Especificación de la aleación	*Densidad (g/cm^3)*	*Dureza Brinell*	*Resistencia a la tracción (Mpa)*	*Resistencia a la conformación (MPa)*	*Módulo de elasticidad (GPa)*
1006 trefilado en frío	7.872	95	330	285	205
1010 trefilado en frío	7.87	105	365	305	205
1020 laminado	7.87	143	450	330	200
1020 trefilado en frío	7.87	121	420	350	205
1020 laminado en caliente	7.87	111	380	205	200
1030 laminado	7.85	179	550	345	205
1030 trefilado en frío	7.87	149	470	260	200
1030 laminado en caliente	7.87	137	470	260	200
1040 laminado	7.845	201	620	415	200
1040 trefilado en frío	7.845	170	585	515	200
1040 laminado en caliente	7.845	149	525	290	205
1050 laminado	7.85	229	725	415	205
1050 trefilado en frío	7.85	197	690	580	200
1050 laminado en caliente	7.87	179	6620	345	205
1060 laminado	7.85	241	814	485	205
1060 recocido a 790° C	7.85	179	625	370	200
1060 laminado en caliente	7.87	201	660	370	205
1080 laminado	7.85	293	965	585	200
1080 recocido a 790° C	7.87	174	615	350	205
1080 laminado en caliente	7.85	229	772	425	205
1095 laminado	7.85	293	965	570	205
1095 recocido a 790° C	7.85	192	665	380	200
1095 laminado en caliente	7.87	248	827	455	205
1117 laminado	7.85	143	490	305	200
1117 trefilado en frío	7.87	143	485	415	200
1117 laminado en caliente	7.87	116	400	220	205
1141 laminado	7.87	192	675	360	205
1141 trefilado en frío	7.85	212	725	605	205
1141 laminado en caliente	7.85	187	650	360	205
1211 trefilado en frío	7.87	163	515	400	200
1211 laminado en caliente	7.87	121	380	230	200
1547 trefilado en frío	7.87	207	710	605	200
1547 laminado en caliente	7.87	192	650	360	200

Tabla B-4 Propiedades del acero inoxidable

Especificación de la aleación	*Densidad (g/cm^3)*	*Resistencia a la tracción (Mpa)*	*Resistencia a la conformación (MPa)*	*Módulo de elasticidad (GPa)*
301	8.03	515	205	212
302	7.86	640	250	193
304	8.00	505	215	200
330	8.00	586	290	197
348, recocido	8.00	620	255	195
384	8.00	510	205	193
405	7.80	469	276	200
420	7.80	2 025	1 360	200
440	7.80	1 720	1 280	200
651	7.94	838	579	200
661	8.25	824	362	200

Apéndice C

Propiedades de los elementos comunes
Explicación de los símbolos inusuales en química

Propiedades de los elementos comunes					
Elemento	*Símbolo*	*Número atómico*	*Masa atómica*	*Densidad sólida a 20° C (g/cm³)*	*Minerales primarios o fuentes*
Aluminio	Al	13	26.9815	2.699	Bauxita (óxidos de aluminio hidratados)
Antimonio	Sb	51	121.75	6.697	Estibina ($SbCl_3$)
Argón	Ar	18	39.948	n/d	n/d
Arsénico	As	33	74.9216	5.72	Arsenopirita (FeAsS)
Bario	Ba	56	137.54	3.60	Barita ($BaSO_4$) y witerita ($BaCo_3$)
Berilio	Be	4	9.0122	1.85	Berilo ($3BeO\text{-}Al_2O_3\text{-}6SiO_2$)
Bismuto	Bi	83	208.980	9.8	Bismita ($Bi2O_3$) y bismuto (BiS_3)
Boro	B	5	10.811	2.34	Muchos incluyendo kernita ($Na_2B_4O_7\text{-}4H_2O$)
Bromo	Br	35	7.904	3.123	Evaporación de soluciones salinas
Cadmio	Cd	48	112.40	8.65	Sulfuro de cadmio (greenockcita) (CdS)
Calcio	Ca	20	40.08	1.54	Calcita ($CaCO_3$), yeso ($CaSO_4\text{-}2H_2O$)
Carbono	C	6	12.01115	2.26	Grafito
Cerio	Ce	58	140.12	8.24	Monacita (mezcla de torio, cesio y otras tierras raras)
Cesio	Cs	55	132.905	1.90	Biotita de cesio (Cs_2O)
Cloro	Cl	17	35.453	n/d	Muchos incluyendo halita (NaCl) y silvita (KCl)
Cromo	Cr	24	51.996	7.19	Cromita ($Fe\text{-}O\text{-}Cr_2O_3$)
Cobalto	Co	27	58.9332	8.90	Muchos incluyendo linaeita (Co_3S_4)
Cobre	Cu	29	63.546	8.94	Calcosita (CuS) y calcopirita ($CuFeS_2$)
Erbio	Er	68	167.26	9.045	Pequeñas cantidades mezcladas con numerosos minerales
Europio	Eu	63	151.96	5.245	Rastros en monacita (ortofosfato con torio)
Flúor	F	9	18.9984	n/d	Criolita ($3NaF\text{-}AlF_3$) y fluoruro de calcio(CaF_2)
Gadolinio	Gd	64	157.25	7.886	Rastros en monacita
Galio	Ga	31	69.72	5.904	Óxido hidratado en mineral de aluminio
Germanio	Ge	32	72.59	5.323	Germantita ($7CuS\text{-}FeS\text{-}GeS_2$)
Oro	Au	79	196.97	19.32	Se encuentra como metal nativo
Hafnio	Hf	72	178.49	13.29	Rastros en minerales de zirconio
Helio	He	2	4.0026	n/d	n/d
Holmio	Ho	67	164.930	8.78	Rastro de impureza en muchos metales
Hidrógeno	H	1	1.00797	n/d	n/d
Indio	In	49	114.82	7.31	Rastros en minerales de hierro, plomo y zinc
Yodo	I	53	126.9044	4.93	Se encuentra en depósitos de nitratos
Iridio	Ir	77	192.2	22.65	Se encuentra en mezclas con platino y otros metales de la serie del platino
Hierro	Fe	26	55.847	7.8733	Hematita(Fe_2O_3)y magnetita (Fe_2O_4)
Kriptón	K	36	83.80	n/d	n/d
Lantano	La	57	138.91	6.166	Rastros en monacita
Plomo	Pb	82	207.19	11.34	Galena (PbS), anglesita ($PbSO_4$) y cerusita ($PbCO_3$)
Litio	Li	3	6.939	0.534	Espodumeno ($Li2\text{-}O\text{-}Al_2\text{-}SO_3\text{-}SiO_2$)
Lutecio	Lu	71	174.97	9.84	Mezclada en bajas concentraciones con otras tierras raras
Magnesio	Mg	12	24.312	1.74	Magnesita ($MGCO_3$) y talco ($Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$)
Manganeso	Mn	25	54.938	7.18-7.44	Pirolusita (MnO_2) y rodocrosita ($MnCO_3$)
Mercurio	Hg	80	200.59	13.546 (líq)	Cinabrio (HgS) y livingstonita ($HgSb_4S_7$)
Molibdeno	Mo	45	95.94	10.22	Molibdenita (MoS_2)

Neodimio	Nd	60	144.24	7.003	Rastros de cantidades en monacita
Neón	Ne	10	20.183	n/d	n/d
Níquel	Ni	28	58.71	7.90	Pentlandita (sulfitos de hierro níquel)
Niobio	Nb	41	92.906	8.57	Novita (Nb_2O_5)
Nitrógeno	N	7	14.0067	n/d	n/d
Osmio	Os	75	190.2	22.61	Se encuentra en mezclas con platino y otros metales de la serie del platino
Oxígeno	O	8	15.9994	n/d	n/d
Paladio	Pd	46	106.4	12.02	Se encuentra en mezclas con platino y otros metales de la serie del platino
Fósforo	P	15	30.9738	1.88–2.69	Minerales de apatita en forma de $Ca_{10}(PO_4)_6X_2$ en donde la X puede ser OH, F o Cl
Platino	Pt	78	195.09	21.45	Se encuentra en mezclas con platino y otros metales de la serie del platino
Potasio	K	19	39.102	0.85	Silvita (KCl) y carnalita ($KCl\text{-}MgCl_2\text{-}6H_2O$)
Praseodimio	Pr	59	140.907	6.769	Rastros de cantidades en monacita
Radón	Rn	86	222.02	n/d	n/d
Renio	Re	75	186.2	21.04	Rastros de cantidades en molibdenita
Rodio	Rh	45	102.905	12.41	Se encuentra en mezclas con platino y otros metales de la serie del platino
Rubidio	Rb	37	84.57	1.532	No en minerales comerciales pero se encuentra junto con óxidos de cesio en la biotita
Rutenio	Ru	44	101.07	12.45	Se encuentra en mezclas con platino y otros metales de la serie del platino
Samario	Sm	62	150.35	7.536	Rastros de cantidades en monacita
Escandio	Sc	21	44.956	2.99	Tortveitita (30% Sc_2O_3)
Selenio	Se	34	78.96	4.28–4.79	Eucairita (CuAgSe) y claustalita (PbSe)
Silicio	Si	14	28.086	2.33	Numerosos silicatos (que contienen iones SiO_4)
Plata	Ag	47	107.868	10.5	Argentita (Ag_2S)
Sodio	Na	11	22.9898	0.967	Halita (NaCl)
Estroncio	Sr	38	87.62	2.60	Celestita ($SrSO_4$) y estroncianita ($SrCO_3$)
Azufre	S	16	32.064	1.94–2.14	Pirita de hierro (FeS_2), calcopirita ($CuFeS_2$) y galena (PbS)
Tantalio	Ta	73	180.948	16.654	Tantalita ($(Fe,Mn)Ta_2O_6$)
Telurio	Te	52	127.60	6.24	Alatita (PbTe), coloradoita (HgTe) y ricardita (Cu_4Te_3)
Terbio	Tb	65	158.924	8.23	Rastros de cantidades en monacita
Talio	Tl	81	204.37	11.85	Rastros en mineral de sulfitos
Torio	Th	90	232.038	11.72	Rastros de cantidades en monacita
Tulio	Tm	69	168.934	9.318	Rastros de cantidades en monacita
Estaño	Sn	50	118.69	5.77α o 7.29β	Casiterita (SnO_2)
Titanio	Ti	22	47.90	4.507	Arizonita ($Fe_2Ti_3O_9$), perovskita ($CaTiO_3$) y rutilo (TiO_2)
Tungsteno	W	74	183.85	19.3	Wolframita ($(Fe,Mn)WO_4$)
Uranio	U	92	238.03	18.97	Pechblenda (mezcla de UO_2 y U_3O_8)
Vanadio	V	23	50.942	6.11	Pequeñas cantidades de V_2O_3 se encuentran en minerales de magnetita y hierro
Xenón	Xe	54	131.30	n/d	n/d
Iterbio	Yb	70	173.04	6.972	Rastros de cantidades en monacita
Itrio	Y	39	88.905	4.472	Rastros de cantidades en monacita
Zinc	Zn	30	65.37	7.133	Esfalenita (ZnS) y smithsonita ($ZnCO_3$)
Zirconio	Zr	40	91.22	6.506	Circón (67.2% ZrO_2, 32.8% SiO_2)

Explicación de los símbolos inusuales en química		
Elemento	*Símbolo*	*Base para el símbolo*
Antimonio	Sb	Del latín *stibium* que significa marca.
Cobre	Cu	Del latín *cuprum* que fue una forma simplificada del nombre original *cyprium*, que fue dado por la minería activa del metal en Chipre.
Oro	Au	Del latín *aurum*.
Hierro	Fe	Del latín *ferrum*.
Plomo	Pb	Del latín *plumbum nigrum*. La palabra *plumbum* significa metal suave.
Mercurio	Hg	Del latín *hydragyrum*, adaptación de una palabra griega que significa plata líquida.
Potasio	K	Del latín *kalium* que significa álcali.
Plata	Ag	Del latín *argentum*, que significa blanco resplandeciente.
Sodio	Na	Del latín *natrium*, que viene de la palabra egipcia *natron* y se refiere a la sal de carbonato de sodio.
Estaño	Sn	Del latín *stannum*.
Tungsteno	W	De Wolfram, nombre acuñado por Johann Wallerius en 1747 a partir de la wolframita de mineral de tungsteno. El nombre Wolfram continúa en uso común en Alemania y Suecia.

GLOSARIO

A

Abrasivos Materiales usados para desgastar otros materiales.

Aceleradores Catalizadores de hidratación que aceleran el rango de hidratación en el cemento Portland.

Acero al carbono Aleación común que consiste de átomos de carbono intersticiales en una matriz de hierro.

Acero hipereuctectoide Solución sólida de hierro-carbono con más de 0.76 wt% de carbono.

Acero hipoeuctectoide Solución sólida de hierro-carbono con menos de 0.76 wt% de carbono.

Acero inoxidable Soluciones sólidas de hierro-carbono con por lo menos 12% de cromo.

Acero inoxidable ferrítico Soluciones sólidas de hierro-carbono con por lo menos 12% de cromo que no contiene níquel.

Acero inoxidable martensítico Solución sólida de hierro-carbono con por lo menos 12 a 17 por ciento de cromo que se pueden someter a la transformación martensítica.

Aceros aleados Soluciones sólidas de hierro-carbono con elementos adicionales añadidos para cambiar sus propiedades.

Aceros inoxidables austeníticos Soluciones sólidas de hierro-carbono con por lo menos 12% de cromo que contiene al menos 7% de níquel.

Aceros para herramientas Soluciones sólidas de hierro-carbono con alto contenido de carbono que resultan en la dureza incrementada y resistencia al desgaste.

Acrílico Tipo de polímero que contiene por lo menos 85% de poliacrilonitrilo (PAN).

Aditivos Moléculas añadidas a un polímero para reforzar o alterar propiedades específicas o moléculas añadidas al concreto para propósitos distintos a la alteración de una propiedad específica.

Adulterante Impureza deliberadamente agregada a un material para mejorar la conductividad del material .

Agente de liberación controlada Sistema implantado en el cuerpo que gradualmente libera un producto farmacéutico a una dosis prescrita.

Agentes colorantes Pigmentos o colorantes que cambian la manera en que la luz es absorbida o reflejada por un polímero.

Agregado Partículas duras, orientadas aleatoriamente en un compuesto de partículas que ayuda al compuesto a soportar cargas de compresión.

Agregados finos Partículas agregadas con un diámetro de menos que 0.25 pulgadas.

Agregados gruesos Partículas agregadas con un diámetro más grande que 0.25 pulgadas.

Agrietamiento Proceso de ruptura de hidrocarburos orgánicos grandes en moléculas más pequeñas.

Agrietamiento por templado Daño causado cerca de la superficie de un metal debido a una distribución dispareja de la temperatura por el rápido enfriamiento exterior y el interior caliente.

Agujero Sitio vacante con carga positiva dejado por un electrón que se mueve a un estado de energía más alto.

Aislante Material que no tiene electrones libres en cero absoluto.

Aleaciones Mezcla de dos o más metales.

Amalgama Aleación basada en mercurio utilizada para rellenos dentales.

Amalgama de alto cobre Amalgama que contiene 50% de mercurio líquido y 50% de un polvo de aleación hecho de 40% de plata, 32% de estaño, 30% de cobre y pequeñas cantidades de mercurio y zinc.

Amalgama de fase gamma 2 Amalgama que contiene 50% de mercurio y 50% de un polvo de aleación hecho de al menos 65% de plata, menos de 29% de estaño, alrededor de 6% de cobre y pequeñas cantidades de mercurio y zinc.

American Concrete Institute (ACI) Sociedad técnica dedicada al mejoramiento del diseño, construcción y mantenimiento de las estructuras de concreto.

Análisis de valor actual Sistema que permite que se forme una comparación directa entre el valor del dinero gastado ahora y el valor real de la misma cantidad del dinero en el futuro.

Análisis del ciclo de vida El método más detallado de analizar el ciclo de vida de un material.

Anchura a media altura (FWHM) Estándar utilizado para medir el esparcimiento en el pico de un difractograma, medido en el valor de intensidad correspondiente al valor medio más alto en el pico.

Angioplastía con balón Procedimiento utilizado para direccionar los bloqueos arteriales que pueden reemplazar el procedimiento quirúrgico del bypass más invasivo. Un balón es puesto junto con un alambre guía e inflado en el área obstruida para expandir la apertura del vaso.

Ángulo crítico de incidencia (c) Ángulo más allá del cual un rayo no puede pasar hacia un material adyacente con un índice de refracción diferente y en su lugar es totalmente reflejado.

Ánodo Sitio en el que ocurre la oxidación en una reacción electroquímica.

Ánodo de sacrificio Un metal bajo en la serie galvánica utilizado para oxidar y transferir electrones a un metal más importante.
Añadiduras Moléculas añadidas a un compuesto para reforzar o alterar sus propiedades específicas.
Aparato de soplado de película Tipo de procesamiento de polímero para hacer productos como bolsas para basura y envolturas de alimentos al forzar al aire hacia adentro desde el troquel y fluye hacia arriba a través del polímero, formando una burbuja que se enfría y se colapsa para formar una película delgada.
Aramida Polímero en el cual más de 85% de los grupos amida están enlazados a dos anillos aromáticos.
Arcilla Material refractario que contiene al menos 12% de dióxido de silicio (SiO_2).
Arcilla refractaria Material de arcilla que contiene de 50% a 70% de sílice y 25% a 45% de alúmina.
Área efectiva de orificio(EOA) Estimado que mide la eficiencia de una válvula.
Arrastrador de aire Aditivo que provoca que se formen burbujas de aire y se distribuyan alrededor del concreto para permitirle soportar ciclos de expansión congelación-descongelación sin fallar.
Arreglo atómico El segundo nivel de la estructura de los materiales que describe cómo los átomos están posicionados entre sí y el tipo de enlace existente.
Asfalto Mezcla de hidrocarburos de alto peso molecular salidos de la destilación de petróleo. También es el nombre común usado para el concreto de asfalto.
Atáctico Término utilizado para describir un polímero que contiene números significativos de diadas sindiotácticas e isotácticas.
Ataque uniforme Tipo de corrosión en la que la superficie total del metal está afectada.
Atenuación Pérdida de resistencia durante la transmisión de una señal óptica resultante de la absorción o dispersión de fotones.
Austenita Fase presente en el acero, dentro de la cual el hierro está presente en una red cristalina FCC con una solubilidad del carbono más alta.
Austenización Proceso a través del cual la red cristalina del hierro en acero se reorganiza de una estructura BCC a una estructura FCC.
Autoinjertos Tejidos de reemplazo formados por la remoción de tejido de otras partes del cuerpo de un paciente que se moldean alrededor de un stent de acero inoxidable.

B

Bainita Producto no equilibrado de acero con partículas de cementita alargadas en una matriz ferrosa.
Banda de conducción Banda que contiene electrones conductivos en un estado de energía más alto.
Banda de valencia Banda que contiene electrones covalentemente enlazados.
Bandas de energía División de los niveles de energía con varianza leve.
Bandeo cruzado En la madera contrachapada, el grano de la chapa de madera está desviada 90 grados de su vecino, provocando que la madera contrachapada sea más resistente a la deformación y el encogimiento que la madera normal.
Barra de error Límite colocado en la eficacia de una media reportada, basado en el número de muestras ensayadas, la desviación estándar y el nivel deseado de confianza.
Barra de refuerzo Barras reforzantes de acero deformado para reforzar la habilidad del concreto para manejar cargas de tracción.
Barril Pieza del aparato de extrusión que contiene un tornillo calentado utilizado para derretir el polímero y forzarlo hacia la siguiente cámara.
Base Pieza central de un transistor BJT hecha de material ligeramente dopado y con alta resistividad.
Bauxita Clase de minerales ricos en óxidos de aluminio que fungen como el mineral principal para la producción de aluminio.
Biocerámicos Cerámicos utilizados en aplicaciones biomédicas.
Biocompatibilidad Capacidad de un material para funcionar dentro de un anfitrión pero sin provocar una respuesta inmune.
Bioética Campo de estudios que examina las repercusiones morales, profesionales y legales de los avances en la biología y la medicina.
Biomateriales Materiales diseñados específicamente para su uso en aplicaciones biológicas como extremidades y membranas artificiales para diálisis así como en huesos y músculos.
Biomateriales estructurales Materiales diseñados para soportar la carga y proporcionar soporte a un organismo viviente como los huesos.
Biomateriales funcionales Materiales que interactúan o reemplazan sistemas biológicos con una función primaria diferente a proporcionar soporte estructural.
Biotecnología Rama de la ingeniería que involucra la manipulación de materiales inorgánicos y orgánicos para trabajar en tándem uno con el otro.
Bisque Material parecido al vidrio que resulta de la cocción de arcilla caolinita.
Boules Monocristales grandes producidos de forma artificial.
Bradicardia Latido irregular del corazón que puede causar complicaciones tan graves como la muerte.

Brazos mioeléctricos Prótesis transradiales que utilizan los impulsos del músculo en el brazo residual para controlar la función de la prótesis.
Brea de mesofase Subproducto de la destilación del alquitrán o el petróleo formado en regiones con orden cristalino líquido a través de tratamiento térmico.
Brecha de energía Brecha entre las bandas de conducción y de valencia.
Bronce Aleación de cobre y estaño.
Bronces de plomo Aleaciones de cobre-estaño que también contienen hasta 10% de plomo que se añade para suavizar el metal.

C

Cabezas femorales Y-TZP Cabeza femoral artificial de reemplazo de biocerámico que utiliza policristales tetragonales de zirconio itrio estabilizadas, las cuales ofrecen mejor rango de uso y mejor resistencia que las cabezas femorales de titanio o aluminio.
Calcinación La segunda etapa en el procesamiento del cemento Portland en el que el carbonato de calcio se convierte a óxido de calcio.
Calcocita (Cu_2S) Mineral de cobre más común.
Calcopirita ($CuFeS_2$) Mineral con contenido de hierro comprendiendo alrededor de 25% de los minerales de cobre.
Caolinita Mineral de arcilla nombrado así por la región Gaolin en China en donde fue descubierto.
Carbonización Pirólisis controlada de un precursor de fibra en una atmósfera inerte.
Catalizadores de hidratación Catalizadores que alteran el rango de hidratación del cemento Portland.
Catéter Tubo insertado en los vasos o ductos del cuerpo, generalmente para promover la inyección o drenaje de fluidos.
Catéter de Foley Tubo utilizado para reemplazar una uretra dañada.
Cátodo Sitio en el que ocurre la reducción en una reacción electroquímica.
Cavidad del acetábulo Cavidad de la cadera hacia la cual se extiende la cabeza femoral.
Cavidad óptica Par de espejos que repetidamente reflejan un rayo de luz a través del medio de ganancia de un láser.
Celda electroquímica Dispositivo diseñado para crear voltaje y corriente a partir de las reacciones químicas.
Celda unitaria La subdivisión más pequeña de una red cristalina que todavía contiene las características de la red cristalina.
Células de alineación ósea Células que sirven como una barrera iónica y alinean el hueso.
Cementita Fase dura y frágil del carburo de hierro (Fe_3C) que se precipita hacia afuera del acero, más allá del límite de la solubilidad del carbono.
Cemento Cualquier material capaz de aglutinar cosas.
Cemento dental Capa de material óseo en los dientes que principalmente proporciona un punto de unión para los ligamentos periodontales.
Cemento Portland El cemento hidráulico más común hecho de silicatos de calcio pulverizados sinterizados.
Cementos hidráulicos Materiales aglutinantes que requieren agua para formar un sólido.
Cementos no hidráulicos Materiales aglutinantes que forman un sólido sin necesidad de agua.
Cerámicos Compuestos que contienen átomos metálicos enlazados a átomos no metálicos como oxígeno, carbono o nitrógeno.
Cerámicos avanzados Materiales cerámicos de ingeniería usados principalmente para aplicaciones de alta gama.
Cerámicos blancos Cerámicos de fina textura usados en vajillas, pisos, azulejos de pared y esculturas.
Cesta Dispositivo capaz de jalar continuamente los filamentos de múltiples itinerantes diferentes sin detener el proceso.
Chatarra Metal disponible para su reciclaje.
Chatarra nueva Metal reciclado de fuentes de preconsumo.
Chatarra vieja Metal reciclado de productos de consumo que han concluido su vida útil.
Ciclo de vida El curso que toma un material desde su formación inicial hasta su desecho final.
Circuito análogo Tipo de circuitos integrados que desarrollan funciones como amplificación, demodulación y filtración.
Circuito digital Tipo de circuitos integrados capaces de desempeñar funciones como flip-flops, compuertas lógicas y otras operaciones más complejas.
Circuitos integrados Muchos transistores integrados en un solo microchip.
Clinkerización Tercera etapa en el procesamiento del cemento Portland en forma de silicatos de calcio.
Cobre blister Producto intermedio durante el refinamiento del cobre del cual se ha removido todo el hierro.
Cobres de baja aleación Soluciones sólidas que contienen por lo menos 95% de cobre.
Coeficiente de Nordheim Constante de proporcionalidad que representa la efectividad de una impureza para incrementar la resistividad.
Coeficiente de Poisson Relaciona la deformación longitudinal y la deformación lateral de un material bajo tensión.

Coeficiente de reflexión Fracción de luz reflejada en la interfase de dos medios.

Coeficiente de transmisión Fracción de luz no reflejada en la interfase de dos medios y en su lugar entra al segundo medio.

Colágeno Proteína estructural con alta resistencia a la tracción que se encuentra en los huesos y en la piel.

Colector La región más grande en un transistor BJT que rodea al emisor y evita el escape de todos los electrones o agujeros.

Colorantes Aditivos disueltos directamente en el polímero, causando que el polímero cambie de color.

Compuesto de matriz de cerámico (CMC) Adición de fibras de cerámico a una matriz de un material cerámico diferente para incrementar significativamente la tenacidad a la fractura del compuesto.

Compuesto híbrido Material compuesto producido con al menos una fase que por sí sola es un material compuesto.

Compuesto reforzado con fibras Compuesto en el cual el único material forma la matriz exterior y transfiere cualquier carga aplicada a las fibras más fuertes y más frágiles.

Compuesto sándwich Compuesto utilizado en situaciones en los que se requiere resistencia pero el peso es un factor significativo. Usualmente hecha de hojas de cara fuerte en los extremos exteriores del compuesto con un material de baja densidad hecho sándwich por dentro, frecuentemente en una estructura de panal, lo que añade rigidez y resistencia a la tensión perpendicula.

Compuestos Material formado al mezclar dos materiales en distintas fases causando un nuevo material con diferentes propiedades de los padres.

Compuestos de matriz metálica Compuestos que utilizan un metal como el material matriz en lugar de matrices poliméricas más comunes.

Compuestos de partículas Compuestos que contienen grandes números de partículas gruesas, como el cemento y la grava que se encuentran en el concreto.

Compuestos dentales Reemplazos de amalgamas que se ven casi como dientes naturales pero son mucho más caras y no duran mucho.

Compuestos granulosos Compuestos que contienen grandes números de partículas gruesas como el cemento y la grava que se encuentran en el concreto.

Compuestos laminares Compuestos hechos mediante la alteración de las capas de materiales diferentes.

Compuestos reforzados con fibras Compuestos en los que un material forma la matriz externa y transfiere cualquier carga aplicada a las fibras más fuertes y más frágiles.

Concreto Compuesto de partículas comercial más importante, el cual consiste de una mezcla de grava o piedra triturada y cemento Portland.

Concreto de asfalto Mezcla de agregados minerales y una fase ligante del asfalto. Un compuesto de partículas más grandes utilizado en carreteras y estacionamientos, que puede refusionarse y reformar. También llamado cemento de asfalto.

Concreto de asfalto de mezcla fría Concreto de asfalto creado al añadir agua y moléculas surfactantes al asfalto, resultando en la creación de concreto de asfalto similar al que se forma a través del proceso de concreto de asfalto de mezcla caliente (HMAC). Esto sirve como el mecanismo principal para el reciclaje del suelo contaminado por petróleo.

Condensadores Dos placas cargadas separadas por un material dieléctrico.

Condición de extinción Reducción sistemática en la intensidad de los picos de difracción de los planos de redes cristalinas específicas.

Condición de isodeformación Condición en la que la calidad de enlace entre la fibra y la matriz es suficiente como para que las dos se alarguen en la misma proporción y experimenten la misma deformación.

Condición de isoesfuerzo Condición en la que las fibras de una matriz esencialmente no ofrecen beneficio de reforzamiento a la matriz cuando se aplica una carga en la dirección transversal, provocando que ambos experimenten esencialmente la misma deformación.

Conductividad eléctrica Habilidad de un material para conducir una corriente eléctrica.

Configuración Arreglo espacial de sustituyentes alrededor de la cadena principal de átomos de carbono que solamente puede alterarse al romperse los enlaces.

Conformación Se refiere a la geometría espacial de la cadena principal y los sustituyentes que se puedan cambiar mediante rotación y movimiento de flexión.

Conformación alternada Conformación que sucede cuando los sustituyentes más grandes de una molécula están desviados 60 grados.

Conformación cis Sucede cuando los sustituyentes alrededor de una cadena de carbono están directamente alineados, provocando la repulsión sustancial entre los sustituyentes y una conformación desfavorable. También se llama conformación eclipsada.

Conformación eclipsada Vea *conformación cis*.

Conformación sesgada Arreglo de los sustituyentes más grandes en donde son desviados 120°.

Conformación trans Conformación en la que los sustituyentes más grandes son desviados 180°. Esta conformación es típicamente la más favorable.

Constante dieléctrica Valor sin dimensión que representa la habilidad de un material eléctrico para oponerse a un campo eléctrico.

Constitución Todo lo relacionado con los enlaces en los polímeros incluyendo los enlaces primario y secundario, la ramificación, la formación de redes y los grupos terminales.

Contractura capsular Endurecimiento del tejido cicatricial alrededor de un implante de seno que puede llevar a su rotura.

Copolímero Polímero hecho de dos o más monómeros diferentes enlazados covalentemente entre sí.

Copolímero aleatorio Polímero compuesto de dos o más monómeros diferentes, que se anexan a una cadena de polímeros sin un orden o patrón particular.

Copolímero alternante Polímero compuesto de dos o más unidades de monómeros diferentes que se anexan a la cadena en un patrón alternante (A-B-A-B-A-B).

Copolímeros de injerto Polímeros en los cuales una cadena de un monómero particular es anexado como una cadena lateral a una cadena de otro tipo de monómero.

Copolímero en bloque Polímero compuesto de dos o más monómeros diferentes que se anexan a la cadena en tiras largas de un tipo de monómero, seguidas de tiras largas de otro monómero (AAAAAAABBBBBBBAAAAA).

Corazón artificial Jarvik-7 Corazón artificial implantado en el paciente Barney Clark en 1982 que lo mantuvo vivo por 112 días.

Corpúsculos Células sanguíneas blancas, células sanguíneas rojas y plaquetas en el torrente sanguíneo.

Corrosión Pérdida de material debido a una reacción química con el medio ambiente.

Corrosión bajo tensión Pérdida de material resultante de la influencia combinada de un ambiente corrosivo y una resistencia a la tracción aplicados.

Corrosión erosiva Pérdida del material resultante de la abrasión mecánica de un metal por un material corrosivo.

Corrosión galvánica Pérdida de material resultante del metal que se encuentra más abajo en la serie galvánica oxidándose a favor del metal más catódico.

Corrosión intergranular Pérdida de material resultante del ataque preferencial de agentes corroyentes en las fronteras de grano.

Corrosión por grietas Pérdida de material resultante de la captura de soluciones estancadas contra el metal.

Corte dentro del plano Aplicación de las tensiones paralelas a la grieta provocando que la porción superior sea empujada hacia delante y la porción inferior sea jalada hacia la dirección contraria.

Corte fuera del plano Aplicación de una tensión perpendicular a la grieta, la cual jala las porciones superiores e inferiores en direcciones contrarias.

Crecimiento del grano Segundo paso en la formación de cristalitas, el cual depende de la temperatura y puede ser descrito utilizando la ecuación de Arrhenius.

Cristalitas Regiones de un material en la que los átomos están acomodados con un patrón regular.

Cristobalita Polimorfo de dióxido de silicio (SiO_2) de alta temperatura que exhibe una red cristalina cúbica.

Cuarto número cuántico Número que representa al spin de un electrón.

Cúbica centrada en el cuerpo (BBC) Red de Bravais que contiene un átomo en cada una de las esquinas de la celda unitaria así como un átomo en el centro de la celda unitaria.

Cúbica de caras centradas (FCC) Red de Bravais que tiene un átomo en cada una de las esquinas de la celda unitaria y un átomo en cada una de las caras de la celda unitaria.

Cúbica sencilla Red de Bravais que tiene un átomo en cada esquina de la celda unitaria.

Curado Endurecimiento o tenacidad de un material polímero a través de un entrecruzamiento de cadenas de polímeros.

Curva de inicio Línea en un diagrama de transformación isotérmica que representa el momento antes de que comience la fase de transformación.

Curva de finalización Línea en un diagrama de transformación isotérmica que indica cuándo se ha completado la fase de transformación.

Curva de finalización a 50% Línea en un diagrama de transformación isotérmica que indica cuándo se ha completado la mitad de la fase de transformación.

Curva S-N Curva que traza los resultados de los ensayos de varias muestras a diferentes niveles de esfuerzo que se utiliza para determinar la vida de fatiga de un material a un nivel de esfuerzo dado.

D

Dahlite Mineral de fosfato de calcio hexagonal en la dentina.

Defecto Frenkel Defecto puntual encontrado en materiales cerámicos que sucede cuando un catión salta hacia un sitio intersticial en la red cristalina.

Defecto puntual Defecto en la estructura de un material que sucede en un solo sitio en la red cristalina, como defectos de vacantes, de sustitución e intersticiales.

Defecto Schottky Defecto puntual que sucede en materiales cerámicos cuando un catión y un anión faltan en una red cristalina.

Defectos de sustitución Defectos puntuales que resultan cuando un átomo en la red cristalina es reemplazado con un átomo de un elemento diferente.

Defectos intersticiales Defectos puntuales que suceden cuando un átomo ocupa un espacio que normalmente se encuentra vacante.

Deformación Propiedad que se determina al medir el cambio en la longitud inicial de una muestra.

Deformación elástica Región en una curva de esfuerzo/deformación en la cual no suceden cambios permanentes al material.

Deformación plástica Región en una curva de esfuerzo/deformación en la cual el material ha experimentado un cambio del cual no se recuperará por completo.

Deformación real Representa la proporción de la longitud instantánea en la longitud inicial de la cadena.

Densidad de corriente Densidad de la corriente eléctrica.

Densidad teórica La densidad que un material tendrá si éste consiste de una sola red cristalina perfecta.

Dentina Material amarillo, poroso, compuesto de colágeno y otras proteínas estructurales mezcladas con dahlite.

Dermis Capa interna de la piel que contiene vasos sanguíneos, glándulas sudoríparas, células nerviosas, folículos de cabello, glándulas sebáceas y músculos.

Desarrollador Solución alcalina que remueve material expuesto cuando se aplica a un microchip.

Designación de temple Nomenclatura que muestra si una aleación de aluminio fue endurecida por deformación o térmicamente tratada.

Deslizamiento El movimiento de dislocaciones a través de un cristal, causado cuando el material se pone bajo tensión cortante.

Desperdicio de vidrio Polvo de vidrio muy fino utilizado en el reciclaje de cerámico.

Desviación estándar Es la raíz cuadrada de la variación. Este valor proporciona más conocimiento respecto a la distancia donde es probable que esté la media en una muestra al azar.

Devanado húmedo de filamentos Proceso de creación de formas más complicadas de compuestos reforzados con fibras a una forma deseada.

Diada isotáctica Configuración de un sustituyente en un polímero, en la que el sustituyente está localizado en el mismo lado de la cadena de polímeros en todas las unidades repetitivas.

Diada sindiotáctica Configuración de un polímero en el que el sustituyente se localiza en los lados opuestos de la molécula en cada unidad repetitiva.

Diagrama de Ashby La heurística usada para proporcionar un medio rápido y sencillo de observar cómo diferentes clases de materiales se desempeñan en términos de propiedades específicas.

Diagrama de fase Representación gráfica de las fases presentes en el equilibrio como función de la temperatura y la composición.

Diagrama de transformación isotérmica Figura utilizada para resumir el tiempo necesario para completar una transformación de fase específica como una función de temperatura para un material dado.

Diagrama de transformación tiempo-temperatura (T-T-T) Vea *Diagrama de transformación isotérmica*.

Diálisis Sistema de filtración de membrana utilizado en pacientes cuyos riñones no son capaces de manejar completamente el removimiento de la urea, otros productos de desperdicio y el exceso de fluidos del torrente sanguíneo.

Diamante Forma alotrópica altamente cristalina del carbono que es el material más duro conocido.

Diamantes negros Diamantes que carecen de la calidad de gema y se utilizan para propósitos industriales.

Dieléctrico Material colocado entre las placas de un condensador para reducir la resistencia del campo eléctrico sin reducir el voltaje.

Difracción La interacción de ondas.

Difusión Movimiento neto de los átomos en respuesta a un gradiente de concentración.

Difusión de la vacante Movimiento de un átomo por sí mismo dentro de la red cristalina en un sitio desocupado.

Difusión intersticial Movimiento de un átomo a partir de un sitio intersticial a otro, sin alterar la red cristalina.

Difusión sustitucional Movimiento de un átomo dentro de una red cristalina misma dentro de un sitio no ocupado.

Difusividad Coeficiente dependiente de la temperatura en relación con el flujo neto para un gradiente de concentración.

Diodo Interruptor electrónico que permite a los electrones fluir en una sola dirección.

Dirección del deslizamiento Dirección en la cual una dislocación se mueve durante el proceso de deslizamiento.

Dirección longitudinal Dirección de la alineación de las fibras.

Dirección transversal Dirección perpendicular a las fibras en un compuesto.

Diseño para el reciclaje (DFR) Esfuerzo para considerar las consecuencias del ciclo de vida al diseñar un material o producto.

Dislocación de tornillo Defecto de la red cristalina que sucede cuando la red cristalina es cortada y cambiada por una fila de espacio atómico.

Dislocaciones Defectos de redes cristalinas de gran escala que resultan de las alteraciones a la estructura de la red cristalina.

Dislocaciones de borde Defectos de redes cristalinas causados por la adición de un plano parcial dentro de una estructura de red cristalina existente.
Dislocaciones mixtas La presencia de dislocaciones de tornillo y de borde separadas por una distancia en la misma red cristalina.
Dispositivo de asistencia ventricular (VAD) Dispositivo que ayuda a un corazón dañado a incrementar su funcionalidad y su rendimiento.
Dispositivo hilador Bloque circular y fijo con pequeños orificios a través de los cuales el polímero fundido puede fluir para tomar la forma de una fibra.
DNQ-Novolac Mezcla de polímero fotorresistente sensible a la luz.
Donador de electrones Molécula que dona electrones a otra sustancia.
Dopantes Impurezas añadidas deliberadamente a un material para mejorar la conductividad del material.
Dúctiles Materiales que se pueden deformar plásticamente sin romperse.
Ductilidad La facilidad con la que un material se deforma sin romperse.
Dureza Capacidad de un material para someterse a una transformación martensítica.
Dureza Resistencia de la superficie de un material a la penetración de un objeto duro bajo una fuerza estática.
Dureza Brinell Una de las muchas escalas utilizadas para evaluar la resistencia de la superficie de un material a la penetración de un objeto duro bajo una fuerza estática.
Dureza Moh Escala cualitativa no lineal que se utiliza para evaluar la resistencia de la superficie de un material a la penetración de un objeto duro.

E

Ecuación de Arrhenius Ecuación generalizada utilizada para predecir la dependencia de temperatura de varias propiedades físicas.
Ecuación de Bernoulli Una forma del equilibro de la energía mecánica relacionando una caída de presión con los cambios de densidad y velocidad dentro de un fluido.
Ecuación de Bragg Fórmula que relaciona el espacio interplanar en una red cristalina con una interferencia constructiva de rayos X difractados. Nombrada en honor de padre e hijo (W. H. y W. L. Bragg) quienes probaron la relación.
Ecuación de Fresnel Relación matemática que describe la cantidad de luz reflejada en la interfase de dos medios distintos.
Ecuación de Hall-Petch Correlación utilizada para calcular el límite elástico de un material dado basado en el tamaño del grano.
Ecuación de Scherrer Medio para relacionar la cantidad de esparcimiento en un difractograma de rayos X con el espesor de las cristalitas en la muestra.
Efecto de memoria de forma Efecto en el que la aleación no cambia la forma cuando la carga se remueve pero regresa a su posición de red cristalina inicial cuando se calienta.
Efecto piezoeléctrico Producción de un campo eléctrico en respuesta a una fuerza mecánica.
Efecto piezoeléctrico converso Cambio en el grosor de un material en respuesta a un campo eléctrico aplicado.
Elastina Proteína estructural que refuerza la resistencia y capacidad de la piel al estiramiento.
Elastómeros Polímeros que pueden estirarse hasta 200% o más y aun así regresar a su longitud original cuando el estiramiento se libera.
Electronegatividad Capacidad de un átomo en enlace covalente de atraer electrones a sí mismo.
Electroquímica Rama de la química que tiene que ver con la transferencia de electrones entre un electrolito y un conductor de electrón.
Elevadores del esfuerzo Grietas, cavidades y otras imperfecciones en un material que causan altos incrementos localizados en el esfuerzo.
Endurecedor Sustancia añadida a la resina epóxica que hace que se entrecruce, el endurecedor se incorpora en el polímero resultante.
Endurecimiento por deformación Vea *Trabajo en frío*.
Endurecimiento por precipitación Vea *Endurecimiento por tiempo*.
Endurecimiento por tiempo Proceso que utiliza la dependencia a la temperatura de las solubilidades de las soluciones sólidas para fomentar la precipitación de partículas finas de las impurezas. También se le llama endurecimiento por precipitación.
Energía de Fermi Nivel de energía de la banda de energía con mayor ocupación.
Energía de impacto Cantidad de pérdida de energía mientras que la muestra de ensayo se destruye durante el ensayo de impacto.
Energía elástica Área contenida bajo la porción elástica de una curva de esfuerzo/deformación, la cual representa cuánta energía puede absorber el material antes de deformarse en forma permanente.
Enlace de hidrógeno Interacción dipolar fuerte resultante entre un átomo de hidrógeno y un átomo altamente electronegativo.
Enlace iónico Donación de un electrón a partir de un material electropositivo a un material electronegativo adyacente.
Enlace metálico Un metal al compartir los electrones entre átomos obtiene excelentes propiedades de conductividad, ya que los electrones están libres para

moverse respecto a la nube de electrones alrededor de los átomos.

Enlace primario Enlace covalente de el esqueleto del polímero y los grupos laterales.

Enlace secundario Enlace altamente dependiente de la distancia entre cadenas de polímeros adyacentes; usualmente incluye el enlace de hidrógeno, los dipolos y las fuerzas de van der Waals.

Ensayo de compresión Proceso de sujetar un material a una carga opresora para determinar la resistencia a la compresión de un material.

Ensayo de dureza Método utilizado para medir la resistencia de la superficie de un material a la penetración por medio de un objeto duro bajo una fuerza estática.

Ensayo de dureza Rockwell Método específico para medir la resistencia de la superficie de un material a la penetración de un objeto duro bajo una fuerza estática.

Ensayo de impacto Charpy Ensayo de un solo golpe llamado así por Georges Charpy en el cual la muestra mellada es rota por un péndulo en movimiento.

Ensayo de plegado Método utilizado para medir la resistencia a la flexión de un material.

Ensayo de templabilidad Jominy Procedimiento utilizado para determinar la dureza de un material.

Ensayo de tracción Método utilizado para determinar la resistencia a la tracción, la resistencia a la ruptura y la resistencia a la conformación de una muestra.

Ensayo de viga voladiza Método utilizado para determinar la fatiga alternando los esfuerzos de tracción y compresión de una muestra.

Ensayo Izod Ensayo de impacto similar al ensayo Charpy en el cual la muestra es alineada verticalmente con la muesca fuera de la vista del martillo.

Epidermis Capa externa de la piel que no contiene células sanguíneas pero recibe sus nutrientes de la difusión de la dermis.

Escleroproteína Proteína estructural con alta resistencia a la tracción.

Esferoidita Producto no equilibrado de acero con esferas de cementita suspendidas en una matriz ferrosa.

Esfuerzo Proporción de la carga aplicada a un área de la sección transversal.

Esfuerzo nominal Valores del esfuerzo que no involucran la presencia de elevadores de esfuerzo dentro del material.

Esfuerzo real Proporción de la fuerza aplicada a una muestra y el área transversal instantánea de una muestra.

Esmalte La sustancia más dura en el cuerpo que cubre los dientes y consiste principalmente de hidroxiapatita.

Espacio interplanar Distancia entre planos repetidos en una red cristalina.

Esqueleto del polímero Átomos enlazados covalentemente, casi siempre de carbono, que componen el centro de la cadena de polímeros.

Estabilización Conversión de un precursor de fibra de carbono a una forma térmicamente estable que no se fundirá durante la carbonización.

Estabilizadores Aditivos que mejoran la resistencia de un polímero a las variables que pueden causar que los enlaces se rompan, como el calor y la luz.

Estados fundamentales Condición en la cual todos los electrones están en sus niveles de energía más bajos.

Estenosis Endurecimiento de una válvula cardiaca que le impide abrir apropiadamente.

Estricción Disminución repentina en el área transversal de la región de una muestra bajo una carga de tracción.

Estructura atómica El primer nivel de la estructura de los materiales que describe los átomos presentes.

Estructura corindón Sistema de red cristalina HCP con cationes que ocupan dos tercios de los sitios octaedrales.

Estructura de la mezcla de zinc Sistema de red cristalina FCC con número igual de cationes y aniones en el cual cada anión está enlazado a cuatro cationes idénticos.

Estructura de panal Forma común utilizada para el material de baja densidad en los compuestos sándwich para añadir rigidez y resistencia a las tensiones perpendiculares.

Estructura de Widmanstätten Microestructura presente en el latón en la que los granos de la fase están rodeados por el precipitado de la fase .

Estructura del cloruro de sodio Sistema de red cristalina en la cual los aniones llenan la cara y los sitios de la esquina en una red cristalina FCC mientras que un número igual de cationes ocupa las regiones intersticiales.

Estructura del cristal El tamaño, la forma y el arreglo de los átomos en una red cristalina tridimensional.

Estructura del fluoruro de calcio (CaF_2) Sistema de red cristalina FCC con cationes que ocupan sitios de la red cristalina, aniones en los sitios tetraedrales y los sitios octaedrales se dejan vacantes.

Estructura espinela Sistema de redes cristalinas FCC con dos especies de catión, una ocupa los sitios tetraedrales y la otra ocupa los sitios octaedrales. Una especie de anión ocupa los sitios de la cara y la esquina en la red cristalina.

Estructura perovskita Sistema de redes cristalinas FCC con dos especies de catión, uno ocupando los sitios de la esquina y el otro ocupando los sitios

octaedrales. Una especie de anión ocupa los sitios de la cara en la red cristalina.

Estudios de envejecimiento acelerado Ensayos que aproximan los impactos de una variable ambiental sobre un material con el paso del tiempo al exponer al material a un nivel más alto de esa variable para tiempos más cortos.

Eutéctico binario Diagrama de fase que contiene seis regiones distintas: una líquida monofásica, dos regiones sólidas monofásicas (α y β) y tres regiones polifásicas (α y β, α y L y β y L).

Eutéctico isotérmico Línea de temperatura constante en un diagrama de fase que pasa a través del punto eutéctico.

Eutectoides Puntos en los cuales una fase sólida está en equilibrio con una mezcla de dos diferentes fases sólidas.

Evaporación-deshidratación Primera etapa en el procesamiento del cemento Portland en el que se saca toda el agua libre.

Extracción de fibra Falla prematura en un compuesto provocada por el enlace inadecuado entre la fibra y la matriz.

Extrusión Proceso en el que un material es empujado a través de un troquel, logrando que el material tome la misma forma del orificio en el troquel.

Extrusor Dispositivo utilizado en el procesamiento de polímeros que derrite pellets de polímero y los alimenta continuamente a través de un dispositivo para darles forma.

F

Factor de concentración del esfuerzo Proporción del máximo esfuerzo al esfuerzo aplicado.

Factor de empaque atómico Cantidad de celdas unitarias ocupadas por átomos en oposición al espacio vacío.

Factor de intensidad de esfuerzo Término que se toma en cuenta para el esfuerzo elevado aplicado a una grieta elíptica cuya longitud es mucho más grande que su ancho.

Falla de copa y cono Falla de los materiales dúctiles, en donde se forma una grieta en donde una pieza tiene un centro plano con un borde extendido como una copa, mientras que la otra tiene una punta casi cónica.

Fase Cualquier parte de un sistema que es física y químicamente homogénea y que posee una interfaz definida con cualquiera de las fases circundantes.

Fatiga Es la falla debido a las tensiones repetidas bajo la resistencia a la conformación.

Fibras de carbono Formas de carbono hechas al convertir una fibra precursora en una fibra totalmente aromática con propiedades mecánicas excepcionales.

Fibras ópticas Vidrio delgado o fibras poliméricas utilizados para transmitir ondas de luz a través de distancias.

Filtro de pantalla Pieza del aparato de extrusión que se utiliza como filtro para separar partículas no derretidas, polvo y otros sólidos contaminantes del polímero fundido.

Fluencia Deformación plástica de un material expuesto a esfuerzo continuo con el paso del tiempo.

Fluencia primaria Primera etapa de la fluencia durante la cual la dislocación de un material se desliza y se mueve alrededor de obstáculos.

Fluencia secundaria Etapa en donde el rango que las dislocaciones se propagan es igual al rango en el cual las dislocaciones son bloqueadas, resultando una región totalmente lineal en la gráfica de deformación/tiempo.

Fluencia terciaria Etapa final de la fluencia durante la cual el rango de deformación se acelera rápidamente y continúa hasta la ruptura.

Fluido de diálisis Agua esterilizada, altamente purificada con sales minerales específicas utilizada en la diálisis.

Forja Conformado por deformación plástica.

Forjado Proceso mecánico para darle nueva forma al metal.

Formulación de resina Proceso en el que pedazos de fibras picadas son mezclados o soplados hacia el material matriz, junto con cualquier agente de curación, acelerador, diluyente, rellenador o pigmento, para formar un compuesto de fibra picada simple.

Fotón Unidad discreta de luz.

Fotoresist Cubierta que se vuelve soluble cuando es expuesta a la luz ultravioleta.

Fractura mecánica Estudio del crecimiento de una grieta que lleva a una falla del material.

Frágiles Materiales que fallan por completo al inicio de la deformación plástica. Estos materiales tienen gráficas lineales de esfuerzo/deformación.

Friable Formación de bordes filosos cuando se rompen bajo tensión.

Fronteras de grano Las áreas de un material que separan las distintas regiones cristalitas.

Fuerza dipolar Interacción electrostática entre moléculas resultantes de la alineación de las cargas.

Fullerenos Vea *Fullerenos de Buckminster*.

Fullerenos de Buckminster Formas alotrópicas de carbono hechas de una red de 60 átomos de carbono enlazadas en forma de pelota de fútbol. También conocidas como buckyballs o fullerenos en honor del arquitecto Buckminster Fuller, quien desarrolló el domo geodésico.

Funcionalidad Número de enlaces que una molécula ha formado.

Fundida Reformado al ser fundido y vertido en un molde.

Fundido Proceso por el cual se refinan los óxidos metálicos en metales puros.

G

Galvanoplastía Deposición electroquímica de una capa delgada de metal en una superficie conductiva.

Gradación Proceso de pasar el agregado a través de platos de cedazo para adquirir distribuciones de tamaños de partículas.

Grado de polimerización Número de unidades de repetición en una cadena polimérica.

Grafito Material del carbono alotrópico consistente de seis anillos de carbono aromático enlazados en planos, permitiendo la fácil incidencia de deslizamiento entre los planos.

Grupos funcionales Arreglos específicos de átomos que causan compuestos orgánicos para comportarse en formas predecibles.

Grupos laterales Átomos anexados al esqueleto del polímero. También llamados sustituyentes.

Grupos terminales Dos sustituyentes encontrados en ambos extremos de una cadena polimérica que tienen poco a nada de efecto en las propiedades mecánicas.

H

Hemodiálisis La forma más común de la diálisis, en la que la sangre del paciente es removida mediante un catéter y pasada a través de una membrana semipermeable para remover las toxinas y el exceso de agua.

Hemoglobina Proteína que contiene hierro que proporciona el oxígeno a las células del cuerpo.

Herrumbre $Fe(OH)_3$ Producto final de la corrosión electroquímica del hierro.

Hidroxiapatita $Ca_{10}(PO4)_6(OH)_2$ Material biomimético que se usa frecuentemente como un relleno de hueso cuando los osteoblastos no pueden reconectar piezas desunidas del hueso sin ayuda.

Hierro bruto Metal que queda en el proceso de fabricación de acero después de que las impurezas se han difundido en la escoria. Cuando se trata con oxígeno para quitar el exceso de carbono, el hierro bruto se convierte en acero.

Hilado por fundición Proceso de empujar polímeros a través de un dispositivo hilador y ventilar las fibras solidificadas hacia un remolque, el cual impone una tensión cortante sobre las fibras corriente arriba mientras emergen del dispositivo hilador.

Hilado por solución Proceso utilizado para hacer fibras termoestables al desarrollar la reacción de polimerización en un solvente mientras el material fluye a través de un dispositivo hilador y hacia un baño de templado.

Hojas de cara Materiales típicamente muy fuertes usados como los extremos exteriores de un compuesto sándwich.

Homoinjertos Tejidos que, después de ser removidos de un cadáver y congelados en nitrógeno líquido, son descongelados e instalados como un reemplazo directo en el cuerpo.

Homopolímero Polímero que se hace a partir de una sola unidad de repetición.

Hook Dorrance Sistema de división de ganchos para amputados transradiales que ofrece cierta capacidad prensil.

Horneo suave Proceso para remover solventes residuales del Fotoresist.

Hueso Material biológico estructural que consiste de un compuesto reforzado con fibras y comprenden el sistema esquelético de la mayoría de los animales.

I

IGFET (Insulated Gate Field Effect Transistor) Transistor hecho sin el uso de óxidos de metal, pero el término es ahora intercambiable con MOSFET.

Implante de gel de silicón Implante de senos que utiliza un saco de caucho de silicón relleno de gel de silicón.

Implantes de senos Bolsas rellenas de líquido insertadas quirúrgicamente en el cuerpo para aumentar el tamaño de los senos o reemplazar el tejido de los senos que ha sido quirúrgicamente removido.

Implantes de senos de silicón de oso gummy Implantes de senos de silicón que eliminan o por lo menos reducen significativamente la fuga del gel de silicón. Llamado así debido a que la textura de la bolsa se asemeja al famoso dulce de gomita.

Implantes de senos de solución salina Alternativa a los implantes de senos de silicón que utiliza salinas en vez de silicón en la bolsa.

Índice de desempeño (PI) Término sin dimensiones que se calcula al dividir el área efectiva de orificio entre un estándar.

Índice de refracción Término específico de material que representa el cambio en la velocidad relativa de la luz mientras pasa a través de un medio específico.

Índices de Miller Sistema numérico usado para representar planos específicos en una red cristalina.

Ingeniería verde Movimiento que apoya el incremento en el conocimiento y prevención de los peligros ambientales causados durante la producción, uso y desecho de los productos.

Iniciación Primer paso en el proceso de polimerización durante el cual un radical libre se forma.
Interés Renta pagada al dueño del dinero por el uso temporal de ese dinero.
Interferencia constructiva El incremento en amplitud resultante de dos o más ondas interactuando en fase.
Interferencia destructiva Nulificación causada por dos ondas interactuando fuera de fase.
Isomórfico binario Aleación de dos componentes con una fase sólida y una fase líquida.
Itinerante Gran número de hebras de fibra sencilla tejidas en paralelo.

L

Laminado Adelgazamiento de una hoja de metal al presionarla entre dos rodillos, cada uno aplicando una fuerza de compresión.
Laminado óseo Hueso que reemplaza el tejido óseo, en el que las fibrillas de colágeno se alinean a lo largo de la longitud del hueso.
Láser Dispositivo que produce luz a partir de una sola longitud de onda en un rayo bien definido. Acrónimo de "amplificación de luz mediante emisión de radiación estimulada".
Latón Aleación de cobre y zinc.
Lehr Horno de recocido utilizado en la fabricación del vidrio.
Ley de Moore Observación empírica acerca de que la densidad de los transistores se duplica cada 18 a 24 meses.
Ley de Schmid Ecuación utilizada para determinar la tensión cortante crítica resuelta en un material.
Ley de Snell Ecuación que describe el cambio en la velocidad de las ondas electromagnéticas que pasan entre dos medios.
Ley de Wolf Proporción del crecimiento del hueso que se adaptará a tensiones ambientales repetidas, haciéndose más fuerte cuando es expuesto a altos niveles de tensión y haciéndose más débil cuando se reduce la tensión.
Límite de confianza Grado de certeza en la estimación de una media.
Límite de resistencia Nivel de tensión bajo el cual hay 50% de probabilidad de que no se lleve a cabo la falla.
Línea de congelamiento Término asociado con los aparatos de soplado de película, que indica el punto en el que las moléculas desarrollan una orientación más cristalina alrededor de la burbuja de aire.
Línea de dislocación Línea que se extiende hacia el plano parcial extra de los átomos en una dislocación de borde.
Línea de líquidus Línea en un diagrama de fase encima de la cual el líquido solamente existe en equilibrio.
Línea de sólidus Línea en un diagrama de fase debajo de la cual los sólidos solamente existen en equilibrio.
Líneas de solvus Líneas que definen el límite entre la fase sólida pura y una unión de dos fases sólidas en un diagrama de fase.
Línea de unión Línea horizontal de temperatura constante que pasa a través del punto de interés.
Litografía de proyección Proceso de proyectar luz ultravioleta en un microchip en una manera similar a un proyector de diapositivas.
Lixiviación selectiva Eliminación preferente de un constituyente de una aleación de metal.

M

Macroestructura El cuarto y último nivel de la estructura de los materiales que describe cómo las microestructuras se ajustan todas juntas para formar el material como un todo.
Madera contrachapada El tipo más común de compuesto laminar, consistente de capas delgadas de chapa de madera unidas con adhesivos.
Marcapasos artificial Pequeño dispositivo implantado en el corazón que, al sentir un latido cardiaco irregular, manda una señal eléctrica para hacer que el corazón lata con normalidad.
Martensita Producto no equilibrado del acero formado por la transformación sin difusión de la austenita.
Masa molecular relativa (RMM) Término usado para representar el peso molecular promedio de una muestra que contiene un amplio rango de longitudes de cadenas poliméricas. Este término se usa para evitar la confusión entre el peso molecular promedio en número y el peso molecular promedio en peso.
Máscara Placa de vidrio transparente usada en el proceso de fotorresistencia.
Materiales amorfos Materiales cuyo orden se extiende sólo a los átomos vecinos más cercanos.
Materiales bio-basados Materiales que se derivan de tejido viviente pero que no sirven como una función para un organismo.
Materiales biológicos Materiales producidos por criaturas vivientes que incluyen huesos, sangre, músculos y otros materiales.
Materiales biomiméticos Materiales que no son producidos por un organismo viviente pero son química y físicamente similares a los que sí lo son.
Materiales electrónicos Materiales que poseen la capacidad de conducir electrones como semiconductores.
Materiales ferroeléctricos Materiales con dipolos permanentes que se polarizan espontáneamente sin la aplicación de un campo eléctrico.
Materiales piezoeléctricos Materiales que convierten la energía mecánica en energía eléctrica y viceversa.

Matriz Material en un compuesto que protege, orienta y transfiere carga al material reforzante.
Mecánica cuántica Ciencia que regula el comportamiento de partículas extremadamente pequeñas como los electrones.
Medida de la toma Peso especificado de un polímero inyectado hacia el molde al final del barril durante el proceso de moldeo por inyección.
Medio de ganancia Sustancia que pasa de un estado de energía más alto a uno más bajo y transfiere la energía asociada hacia un rayo láser.
Metales Materiales que poseen átomos que comparten electrones deslocalizados.
Método HPHT Proceso para la producción de diamantes sintéticos utilizando temperaturas elevadas y altas presiones.
Mezclas Dos o más polímeros combinados mecánicamente pero sin enlace covalente entre ellos.
Microestructura El tercer nivel de estructura de los materiales que describe la secuencia de los cristales en un nivel invisible para el ojo humano.
Microscopía óptica Uso de luz para ampliar objetos hasta 2 000 veces.
Microscopio electrónico de barrido (SEM) Microscopio que enfoca un haz de electrones de alta energía en la fuente y compila el rayo dispersado incidente de estos electrones.
Microscopio electrónico de transmisión (TEM) Microscopio de electrones que pasa el haz de electrones a través de la muestra y utiliza las diferencias entre la dispersión y la difracción del rayo para ver el objeto deseado.
Mineralización Crecimiento de la matriz del hueso en fibrillas de colágeno.
Modelo de Bohr Representación clásica de la estructura atómica en la cual los electrones orbitan el núcleo cargado positivamente en distintos niveles de energía.
Modelo de muñeca rusa Representación de nanotubos de carbono multiparedes en los que las placas externas de grafeno rodean a las internas, muy parecido a las matriuskas.
Modificadores de red Aditivos utilizados para reducir la viscosidad de redes flexibles en los vidrios.
Módulo de elasticidad Pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la región elástica. También llamado módulo de Young o módulo de elasticidad.
Módulo de resiliencia Proporción de la energía elástica para la deformación en el límite, el cual determina cuánta energía se utilizará para la deformación y cuánta será traducida en movimiento.
Módulo de ruptura (fr) Resistencia máxima a la tensión en el fondo de la superficie de una viga de concreto.
Módulo de tracción Vea *Módulo de elasticidad*.
Módulo secante de elasticidad efectivo Módulo secante de elasticidad especificado por el Instituto Americano del Concreto para el concreto que cuenta para la tendencia del módulo de elasticidad para la variación del concreto con el nivel de tensión.
Moldeo de transferencia de resina Proceso de conversión de esteras o tejidos a compuestos a través del uso de un molde, en el que la estera se coloca y se inyecta con resina a presión suficientemente alta como para permear y rodear la estera tejida.
Moldeo por inyección Clase de procesamiento de polímero similar a la extrusión pero puede utilizarse para desarrollar rápidamente partes con formas complicadas.
Monocristales Materiales en los que la estructura total es un grano único e indivisible.
Monómero Bloque de construcción de bajo peso molecular repetido en la cadena polimérica.
Monómero de vinilo Molécula orgánica de doble enlace usada para iniciar la polimerización por adición.
Mosaico de cristal Estructura hipotética para irregularidades en las fronteras entre cristalitas.
MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors) Transistor hecho originalmente con óxidos de metal, pero el término es ahora intercambiable con IGFET.
Movilidad de deriva Constante de proporcionalidad que relaciona la velocidad de deriva con un campo eléctrico aplicado.
Mullita Mineral de arcilla formado por aluminosilicatos de alta temperatura.

N

Nanocristales Materiales cristalinos con tamaños de nanómetros en longitud.
Nanotubos de carbono Tubos sintéticos de carbono formados al doblar una lámina de grafeno sobre otra.
Nitinol Aleación de níquel-titanio utilizada en la fabricación de stents que experimenta un efecto de memoria de forma.
Nódulo sinusal Racimo de células que generan una señal eléctrica que controlan los latidos dentro de un corazón normal.
No polar Interacción en la cual la densidad del electrón alrededor de los átomos adyacentes es simétrica.
Normas ASTM Lineamientos publicados por la American Society for Testing and Materials que proporcionan los procedimientos detallados para los ensayos a fin de asegurar que los realizados en diferentes laboratorios sean directamente comparables.

Nucleación Proceso de formación de pequeños racimos de átomos alineados que sirven como marco para el crecimiento de cristales.
Nucleación heterogénea Formación de racimos de átomos alrededor de una impureza que proporciona una plantilla para el crecimiento de cristales.
Nucleación homogénea Formación de racimos que ocurre cuando un material puro se enfría lo suficiente para autosoportar la formación de núcleos estables.
Núcleos Pequeños racimos de átomos acomodados que sirven como marco para el subsecuente crecimiento de cristales.
Número cuántico principal Número que describe la capa interior mayor en la cual un electrón está ubicado.
Número de coordinación Número de aniones en contacto con cada catión en una red cristalina de cerámico.
Número de tamaño del grano Una cantidad numérica desarrollada por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) para caracterizar los tamaños de granos en los materiales.
Números cuánticos Cuatro números utilizados para clasificar electrones individuales con base en su energía, forma y orientación de la nube, y spin.
Nylon Tipo de poliamida en el cual menos de 85% de los grupos amida están enlazados a anillos aromáticos.

O

Oligómero Cadena pequeña de monómeros enlazados cuyas propiedades serán alteradas por la adición de una unidad más de monómero.
Operaciones de conformado Técnicas para alterar la forma de los metales sin derretirse.
Orbitales Niveles de energía discretos en los cuales los electrones giran alrededor del núcleo de un átomo.
Oseointegración Proceso en el que la hidroxiapatita se vuelve parte de la matriz ósea creciente.
Osteoblastos Células localizadas cerca de la superficie del hueso que producen osteoide.
Osteoide Mezcla de proteínas estructurales (principalmente colágeno) y hormonas que regulan el crecimiento de huesos.
Osteocitos Osteoblastos atrapados en la matriz del hueso que facilitan la transferencia de nutrientes y materiales de desperdicio.
Osteoclastos Células que disuelven la matriz del hueso utilizando fosfatasa ácida y otros químicos para permitir al cuerpo reabsorber el calcio en el hueso.
Oxidación Reacción química en la que un metal transfiere electrones a otro material.
Óxidos intermediarios Aditivos utilizados para impartir propiedades especiales a los vidrios.
Oxigenoterapia Sangre artificial capaz de absorber oxígeno de los pulmones y liberarlo a través del cuerpo.

P

Paquete cerrado hexagonal (HCP) La más común de las redes de Bravais no cúbicas que tiene seis átomos que forman un hexágono en las partes superior e inferior y un átomo sencillo posicionado en el centro entre dos anillos hexagonales.
Parámetro de Fuller-Thompson Parámetro utilizado en la ecuación usada para determinar la densidad de empaquetamiento máximo en el concreto.
Parámetro de Larson-Miller Valor utilizado para caracterizar la fluencia basada en el tiempo, la temperatura y las constantes específicas de los materiales.
Parámetros de redes cristalinas Las longitudes de la orilla y los ángulos de una celda unitaria.
Pasivación Formación espontánea de una barrera protectora que inhibe la difusión del oxígeno y la corrosión.
Pasta de cemento Mezcla de partículas de cemento y agua.
Periclasa Material refractario que contiene al menos 90% de óxido de magnesio (MgO).
Peritécticos Puntos en los cuales un sólido y un líquido están en equilibrio con una fase sólida diferente.
Perlita Mezcla de cementita (Fe_3C) y ferrita α llamada así por su semejanza con el nácar.
Perlita fina Microestructura de acero con capas delgadas alternantes de cementita y ferrita α.
Perlita gruesa Microestructura de acero con capas gruesas alternantes de cementita y ferrita α.
Peso molecular promedio en número Forma del peso molecular de una muestra de cadenas poliméricas determinadas mediante la división de la masa del espécimen entre el número total de moles presentes.
Peso molecular promedio en peso Un método de expresar el peso molecular de una muestra de polímeros con promedio basado en el peso. Este método es más útil cuando las moléculas grandes en la muestra dominan el comportamiento de la muestra.
Picaduras Forma de corrosión que resulta del material corrosivo juntado en los pequeños defectos de la superficie.
Pie SACH Pie articulado con tobillo macizo; la prótesis transtibial más común, la cual contiene una cuña de goma en el tobillo y una quilla sólida, frecuentemente de madera.
Piedra china Mezcla de cuarzo y mica utilizada para hacer porcelana china.
Pigmento Agente colorante que no se disuelve en el polímero.

Planos de capas de grafeno Planos paralelos consistentes de anillos de seis miembros de carbono aromático conjugados.

Planos de deslizamiento Los nuevos planos formados después de que el material ha sido objeto de deslizamiento.

Plasma Fluido amarillo que forma 60% del volumen total de la sangre.

Plásticos termoestables Polímero que no puede ser derretido repetidamente y reformado ya que tiene un fuerte enlace covalente entre cadenas.

Plastificador Aditivo que provoca hinchazón, lo que permite a las cadenas de polímeros deslizarse delante de otra más fácilmente, haciendo al polímero más suave y más flexible. También se utiliza para reducir la viscosidad de la pasta de cemento para hacer que el concreto fluya más fácil hacia su forma final.

Polar Interacción en la cual la densidad del electrón alrededor de los átomos adyacentes es asimétrica.

Polarización Conectar una batería con la terminal positiva correspondiente con un sitio tipo *p* y la terminal negativa correspondiente con un sitio tipo *n*.

Polarización inversa Conectar una batería con la terminal positiva correspondiente con un sitio tipo *n* y la terminal negativa correspondiente con un sitio tipo *p*.

Poliamida Polímeros que contienen grupos amida (—N—) en la cadena.

Poliéster Polímeros de cadena larga que contienen por lo menos 85% de un éster de un ácido carboxílico aromático sustituido. Estas fibras son fuertes y se pueden teñir o hacer transparentes.

Polimerización de crecimiento de cadena Vea *Polimerización por adición*.

Polimerización de radical libre Vea *Polimerización por adición*.

Polimerización por adición Uno de los dos esquemas de reacción más comunes usados para crear polímeros, que involucra tres pasos: iniciación, propagación y terminación. También llamada polimerización de crecimiento de cadena y polimerización de radical libre.

Polimerización por condensación Formación de un polímero que ocurre cuando dos grupos terminales potencialmente reactivos en un polímero reaccionan para formar un nuevo enlace covalente entre las cadenas poliméricas. Esta reacción también forma un subproducto, que típicamente es agua. También conocido como polimerización por crecimiento en etapas.

Polimerización por crecimiento en etapas Vea *Polimerización por condensación*.

Polímeros Cadenas de moléculas enlazadas covalentemente con unidades monómeras pequeñas repetidas de extremo a extremo.

Polímeros termoestables Polímeros que no se pueden fusionar y reconformar repetidamente debido a un enlace covalente fuerte entre cadenas.

Poliolefinas Polímeros que contienen sólo hidrógeno y carbono alifático.

Poliuretanos Amplia categoría de polímeros que incluye todos los polímeros que contienen enlaces de uretano.

PolyHeme Sustituto de sangre mejorado basado en hemoglobina sobre el que la Food and Drug Administration inició ensayos clínicos a finales de 2003.

Porcelana Cerámico blanco traslúcido debido a la formación de vidrio y mullita durante el proceso de cocción.

Porcentaje del trabajo en frío (%CW) Representación de la cantidad de deformación plástica experimentada por un metal durante el endurecimiento por deformación (trabajo en frío).

Poros capilares Espacios abiertos entre los granos.

Poros de gel Espacios dentro del material C-S-H durante la hidratación del cemento.

Posiciones octaedrales Espacios intersticiales entre seis átomos en una red cristalina que forma un octaedro.

Posiciones tetraedrales Cuatro sitios intersticiales presentes en las redes cristalinas que forman un tetraedro cuando las líneas son dibujadas desde el centro de los sitios.

Preimpregnación Proceso de creación de prepregs al sumergir las fibras en un baño de resina y calentándolas ligeramente para asegurar que la cubierta se adhiera.

Prensado o compactación Formación de un material sólido mediante la compactación de partículas bajo presión.

Prepreg Paquete de fibra ya impregnado con material matriz que puede convertirse en un compuesto sin necesidad de procesamiento adicional.

Primera ley de Fick Ecuación que determina la difusión del estado estacionario.

Principio de exclusión de Pauli Establece que no puede haber más de dos electrones en cualquier orbital y que los dos electrones deben tener spines opuestos.

Proceso de aerosol de flama Método para producir nanopartículas de cerámico en el que un orgánico metálico líquido se coloca en una flama para formar un núcleo para el crecimiento de partículas.

Proceso de concreto de asfalto de mezcla caliente (HMAC) Proceso utilizado para producir más asfalto en vías principales, en las que el asfalto se calienta a 160° C antes de mezclar el agregado y luego colocado y compactado a 140° C.

Proceso de concreto de asfalto de mezcla tibia (WAM) Proceso de creación de concreto de asfalto añadiendo

zeolitas para bajar la temperatura de reblandecimiento hasta 25° C. Esto reduce la emisión liberada y el costo, y crea condiciones de trabajo más placenteras.

Proceso del vidrio flotado Técnica de producción de vidrio en la que un listón fino de vidrio se envía desde un horno y luego flota en la superficie de una alberca de estaño fundido.

Proceso Pittsburgh Proceso para fabricar vidrio desarrollado en 1928 para reducir su costo y la distorsión.

Proceso viscoso Técnica usada para hacer el rayón, que involucra el tratar la celulosa a partir de la madera o el algodón con alquilo y extruir éste a través de un dispositivo hilador.

Productos estructurales de la arcilla Cualquier material cerámico utilizado en la construcción de edificios, incluyendo ladrillos y terracota.

Propagación Segunda etapa del proceso de polimerización durante la cual la cadena de polímeros empieza a crecer como monómeros agregados a la cadena.

Protección catódica Forma de resistencia a la corrosión proporcionada por el uso de un ánodo de sacrificio.

Prótesis de extremidades Extremidades artificiales de reemplazo.

Prótesis transtibiales Extremidades artificiales que comienzan por debajo de la rodilla.

Pulpa dental Tejido suave viviente en el centro de un diente.

Pultrusión Proceso utilizado frecuentemente para crear compuestos reforzados con fibras uniaxiales.

Punto eutéctico Aquel que está en un diagrama de fase en el cual las dos fases sólidas se derriten completamente para formar una fase líquida monofásica.

Q

Queratina Proteína estructural dura contenida en los queratinocitos.

Queratinización Proceso en el que después de alrededor de 30 días, las células epidérmicas se secan y se caen del cuerpo para hacer espacio para el siguiente nivel de células.

Queratinocitos Células que comprenden 90% de la epidermis y contienen una gran cantidad de queratina.

Quilla Barra grande que reemplaza la tibia faltante en una prótesis de extremidad transtibial.

R

Radical libre Molécula que contiene un electrón no pareado altamente reactivo.

Ramificación Formación de cadenas laterales a lo largo del esqueleto del polímero.

Rango de fluencia Cambio en la pendiente de la gráfica deformación/tiempo en cualquier punto durante el ensayo de fluencia.

Rayón Polímero de peso ligero que absorbe bien el agua; el primer polímero sintético que se construyó.

Receptor de electrones Molécula que acepta electrones de otra sustancia.

Recocido Proceso de tratamiento de calor que revierte los cambios en la microestructura de un metal después de un trabajo en frío; sucede en tres etapas: recuperación, recristalización y crecimiento del grano.

Recombinación Proceso en el que los agujeros en un semiconductor tipo *p* y los electrones en un semiconductor tipo *n* se cancelan entre sí.

Recristalización Segunda etapa del recocido en la cual ocurre la nucleación de pequeños granos en las fronteras de los subgranos, dando por resultado una reducción significativa en el número de dislocaciones presentes en el metal.

Recuperación Primera etapa del recocido en la cual grandes granos deformes forman un material y los esfuerzos residuales se reducen.

Red de polímero Estructuras tridimensionales que resultan cuando las cadenas poliméricas forman números importantes de entrecruzamientos químicos.

Red flexible Arreglo molecular en los vidrios en el que no hay orden de rango largo pero los tetraedros adyacentes SiO_4^{4-} comparten un átomo de oxígeno de esquina.

Redes de Bravais Las 14 estructuras distintas del cristal en las cuales los átomos se arreglan entre sí en los materiales.

Reducción Reacción química en la que un material recibe electrones transferidos de un metal.

Reestenosis Acumulación de tejido cicatricial alrededor de un stent, que lleva a una restricción en el torrente sanguíneo.

Reflexión Proceso en el que los fotones entrantes disparan liberaciones de fotones idénticos de tal manera que el ángulo de incidencia iguala al ángulo de reflexión.

Reflexión difusa Amplio rango de ángulos de reflectancia que resultan de las ondas electromagnéticas que golpean objetos en bruto con una variedad de ángulos de superficie.

Reflexión especular Reflexión de servicios sin problemas con una pequeña variación en el ángulo de reflexión.

Refracción Proceso en el que los fotones entrantes tienen su camino alterado en el nuevo medio.

Refractarios Materiales capaces de soportar altas temperaturas sin fundirse, degradarse o reaccionar con otros materiales.

Regla de la palanca Método para determinar las composiciones de materiales en cada fase usando las líneas de unión segmentadas que representan todos los porcentajes de peso de los diferentes materiales.
Regla de Matthiessen Regla que dicta que la temperatura, las impurezas y la deformación plástica actúan independientemente entre sí al impactar la resistividad de un metal.
Regla de Nordheim Método para calcular la resistividad de una aleación binaria.
Regurgitación Sangre que se fuga de vuelta a la cámara anterior del corazón cuando una válvula falla al cerrar apropiadamente.
Relación de aspecto Proporción de la longitud al diámetro de la fibra utilizada en un compuesto reforzado con fibra.
Rellenos Aditivos cuyo propósito principal es reducir el costo del producto final.
Remodelación Proceso continuo en el que el hueso es reabsorbido y reemplazado a través de la vida de un organismo.
Remolque Carrete grande que se utiliza para ventilar fibras de polímero solidificado después de que se han empujado a través del dispositivo hilador.
Resina bis-GMA (Bisfenol-A-Glicidil Metacrilato) Material aglutinante en la mayoría de los compuestos dentales, junto con materiales de relleno como polvo de vidrio.
Resina de éster de vinilo Material de matriz polimérica que combina las ventajas económicas de las resinas de poliéster y las propiedades excepcionales de las resinas epóxicas.
Resina de poliéster La opción más económica para un material matriz en compuestos en situaciones en las que las propiedades mecánicas de la matriz no son cruciales para la aplicación.
Resina epóxica Resina utilizada como matriz en materiales compuestos que es más caras que la resina de poliéster pero proporciona propiedades mecánicas mejoradas y resistencia ambiental excepcional.
Resina fenólica Material matriz que tiene muchas cavidades y propiedades mecánicas pobres pero ofrece un nivel de resistencia al fuego.
Resinas de poliimida Materiales de matriz polimérica que son extremadamente caros y usados sólo en aplicaciones de alta gama, debido a su habilidad para mantener sus propiedades a temperaturas por arriba de los 250° C.
Resistencia a la conformación Tensión en el punto de transición entre las deformaciones elástica y plástica.
Resistencia a la conformación compensatoria Es el estimado de una transición entre las deformaciones elástica y plástica de un material sin una región lineal en una curva de esfuerzo/deformación.
Resistencia a la flexión Cantidad de esfuerzo de flexión que un material puede soportar antes de romperse. La cual se mide a través del ensayo de plegado.
Resistencia a la ruptura Tensión en la cual el material se rompe completamente durante el ensayo de tracción.
Resistencia a la tracción Tensión aplicada a la fuerza más alta en una curva de esfuerzo/deformación.
Resistencia máxima a la compresión de 28 días Resistencia a la compresión del concreto a partir de una muestra probada que fue endurecida a temperatura constante y 100% de humedad durante 28 días.
Resistividad eléctrica Barrera a la conducción de electrones provocada por colisiones dentro de la red cristalina.
Respuesta inmune Células sanguíneas blancas que identifican un material foráneo en el cuerpo que intenta destruirlo.
Retardadores Catalizadores de hidratación que disminuyen el rango de hidratación en el cemento Portland.
Ruptura de Zener Aceleración rápida del transporte provocada porque la polarización inversa se hace muy larga, lo cual incita a otros transportes en la región a provocar una corriente grande repentina en la dirección opuesta.

S

Segunda ley de Fick Ecuación que representa el cambio dependiente del tiempo en la difusión.
Segundo número cuántico Número que describe la forma de la nube del electrón.
Semiconductor extrínseco Creado mediante la introducción de impurezas llamadas dopantes dentro de un semiconductor.
Semiconductor intrínseco Material puro que tiene un rango de conductividad como la de los aislantes y los conductores.
Semiconductor tipo n Semiconductor en el que un dopante dona electrones a la banda de conducción, haciendo que el número de agujeros sea menor que el número de electrones en la banda de conducción.
Semiconductor tipo p Semiconductor en el que un dopante remueve los electrones de la banda de valencia, provocando que haya más agujeros que electrones en la banda de valencia.
Semiconductores Materiales que tienen un rango de conductividad entre los conductores y los aislantes.
Sensibilizados Hechos más susceptibles a la corrosión intergranular por la disminución localizada de un elemento precipitado en la región de una frontera de grano.

Señal mixta Tipo de circuitos integrados con circuitos análogo y digital en el mismo chip.
Serie galvánica Lista que ordena los metales según su tendencia a oxidarse cuando se conectan con otros metales en soluciones con sus iones.
Silicón extracapsular Silicón que se escapa de la cápsula dura de tejido cicatricial que rodea a un implante de seno y está libre para migrar a través del cuerpo.
Sinterizado Convertido en sólido a partir de partículas, calentándolas hasta que las partículas individuales se peguen.
Sistema de deslizamiento Compuesto por el plano de deslizamiento y la dirección de deslizamiento.
Sistema primario de deslizamiento Primer conjunto de planos de un material en experimentar un deslizamiento bajo una tensión aplicada.
Solubilidad Cantidad de una sustancia que puede ser disuelta en una cantidad determinada de solvente.
Sol-gel Material causado por la formación de una suspensión coloidal de sales metálicas luego secadas en un molde dentro de un gel sólido húmedo.
Spin Concepto teórico que facilita a los electrones individuales dentro de los subniveles a distinguirse uno del otro.
Spin opuesto Electrones con el cuarto número cuántico diferente.
Spin paralelo Electrones con el mismo cuarto número cuántico.
Stent de Palmaz Stent de balón expandible hecho de acero inoxidable.
Stent vascular Malla metálica pequeña insertada en los vasos sanguíneos durante la angioplastía para mantener la arteria abierta después del procedimiento.
Stents autoexpandibles Stents que son desplegados mediante el uso de un catéter.
Stents de balón expandibles Stents que caben en el balón de angioplastía y se expanden cuando se infla el balón.
Sustentabilidad Periodo en el que un material permanecerá adecuado para uso.
Sustituyentes Vea *Grupos laterales*.

T

Tabla t Tabla estadística basada en los grados de libertad y el nivel de incertidumbre en un conjunto de valores de muestra reportados.
Tacticidad Configuración relativa de carbonos adyacentes asimétricos.
Tamaño de barra Categorización del diámetro de la barra de refuerzo, con cada número representando 0.125 pulgadas adicionales.
Tejido óseo Durante el crecimiento y la reparación, los huesos producidos en los que las fibrillas de colágeno aleatoriamente se alinean.
Temperatura Curie Temperatura por arriba de la cual un material ya no despliega propiedades ferromagnéticas.
Temperatura de recristalización Temperatura que marca la transición entre la recuperación y la recristalización.
Temperatura de transición vítrea Transición termodinámica de segundo orden en la cual el inicio de movilidad de una cadena a gran escala ocurre en los polímeros. Por debajo de Tg, el polímero se parece al vidrio y es frágil. Por arriba de Tg, el polímero se vuelve chicloso y flexible.
Templado Terminación de una reacción de polimerización por condensación mediante la adición de un material con un sólo grupo funcional.
Tenacidad Propiedad que define la resistencia del material a los golpes, la cual se mide a través del ensayo de impacto.
Tenacidad a la fractura Valor que el factor de concentración del esfuerzo debe superar para permitir la propagación de la grieta.
Tenacidad a la fractura de deformación plana Dureza de la fractura por arriba del grosor crítico en donde el ancho del material no impacta más a la tenacidad.
Tensión crítica cortante resuelta Nivel de tensión más bajo en que el deslizamiento comenzará en un material.
Tensiones de apertura Tensiones que actúan perpendicularmente a la dirección de la grieta, provocando que las orillas de la grieta se separen y abran más la grieta.
Tercer número cuántico Número que representa la orientación de la nube del electrón.
Terminación Etapa final en el proceso de polimerización que causa el alargamiento de la cadena del polímero para que llegue a un final.
Terminación mutua Uno de los dos tipos diferentes de terminación en el proceso de polimerización. Durante este tipo de terminación, los radicales libres de dos cadenas de polímeros diferentes unidas al final del proceso de propagación.
Terminación primaria Última etapa en el proceso de polimerización que ocurre cuando el radical libre de una cadena polimérica se une con el radical libre a un grupo final.
Termoplástico Polímero con un punto de fusión bajo debido a la falta de enlace covalente entre las cadenas adyacentes. Tales polímeros se pueden derretir repetidamente y ser reformados.
Termoplásticos de alto volumen (HVTP) Materiales poliméricos sencillos producidos como pellets en grandes cantidades.
Terracota Material cerámico hecho con arcilla rica en óxido ferroso que se reconoce por su color rojizo-naranja.

Tiempo de propiedad equivalente (EPT) Periodo utilizado para forzar a que ocurra el mismo proceso de envejecimiento en una muestra dentro de un periodo más corto.
Tolva Parte del aparato de extrusión que sostiene una gran cantidad de pellets de polímero mientras son alimentados hacia el barril.
TOSLINK Conector común para cables ópticos.
Trabajo en caliente Proceso en el cual las operaciones de formado se desempeñan por arriba de la temperatura de recristalización del metal. Dicha recristalización ocurre de forma continua y el material se puede deformar plásticamente de manera indefinida.
Trabajo en frío Deformación de un material arriba de su resistencia a la conformación pero debajo de la temperatura de recristalización, resultando en una mayor resistencia a la conformación pero menor ductilidad. También conocido como endurecimiento por deformación.
Transductores Dispositivos que convierten las ondas de sonido en campos eléctricos.
Transformación martensítica Conversión sin difusión de una forma de red cristalina a otra como resultado de un enfriamiento rápido.
Transición dúctil a frágil Transición de algunos metales en donde un cambio en la temperatura provoca que éstos se transformen entre un comportamiento dúctil y frágil.
Transistor de unión bipolar (BJT) Dispositivo electrónico prototípico desarrollado en 1948 utilizado para amplificar señales.
Transistores Dispositivos que sirven como dispositivos de ampliación o de conmutación en la microelectrónica.
Transmisión Proceso en el que los fotones entrantes pasan a través de un material sin interactuar.
Transradiales Debajo del codo.
Tratamiento térmico de precipitación El segundo paso en el endurecimiento por tiempo en el que el rango de difusión se incrementa lo suficiente como para permitir que una fase forme un precipitado fino.
Tratamiento térmico de solución El primer paso en el endurecimiento por tiempo que involucra el calentamiento hasta que una fase se ha disuelto completamente en la otra.
Trefilado Proceso en el que un metal es jalado a través de un troquel, haciendo que el material forme un tubo del mismo tamaño que el orificio en el troquel.
Trepado de la dislocación Mecanismo mediante el cual las dislocaciones se mueven en direcciones perpendiculares al plano de deslizamiento.
Trepado negativo El llenado de una vacante en el plano parcial de la dislocación de un borde mediante un átomo adyacente resultante en el crecimiento del cristal en la dirección perpendicular al plano parcial.
Trepado positivo El llenado de una vacante en el plano parcial de una dislocación de borde mediante un átomo adyacente resultante en el encogimiento del cristal en la dirección perpendicular al plano parcial.
Tridimita Polimorfo de dióxido de silicio (SiO_2) de alta temperatura que presenta una red cristalina hexagonal.
Trombosis Coagulación de la sangre. Parte del aparato de procesamiento del polímero a través del cual el polímero es empujado, provocando que el polímero forme una forma simple como una varillaa o un tubo.
Turboestrática Estructura en la que las irregularidades en planos paralelos de otra manera causan distorsión.

U

Ultrafiltración Proceso en el que la presión diferencial provoca que el agua pase a través de la membrana en la diálisis, reduciendo el exceso de fluido y la concentración de electrolitos en la sangre.
Unidad estructural Vea *unidad de repetición*.
Unidad de repetición Porción más pequeña que se repite en un polímero. También conocida como unidad estructural.
Unión p-n Área en el que las áreas tipo *p* y tipo *n* se encuentran.

V

Vacantes Defectos puntuales que resultan de la ausencia de un átomo en un sitio particular de la red cristalina.
Valor del dinero en el tiempo El concepto de que el dinero futuro vale menos que el dinero en el presente debido al interés que se pudo haber ahorrado.
Válvula aórtica Válvula cardiaca ubicada entre el ventrículo izquierdo y la aorta que regula la entrada de sangre oxigenada hacia el cuerpo.
Válvula bivalva de St. Jude Válvula cardiaca artificial que presenta dos opúsculos (discos semicirculares) que se mueven aparte cuando la válvula está abierta para crear tres regiones separadas de flujo.
Válvula de bola y jaula Válvula cardiaca artificial que utiliza una bola para sellar la válvula.
Válvula de Starr-Edwards El único diseño de válvula de bola y jaula moderno aprobado para su uso por la FDA.
Válvula Hall de Medtronic Válvula de inclinación de disco más común utilizada como una válvula cardiaca artificial.
Válvula mitral Válvula cardiaca que separa al ventrículo izquierdo del atrio izquierdo.
Válvula pulmonar Válvula cardiaca que controla el flujo de sangre hacia los pulmones.

Válvula tricúspide Válvula cardiaca que separa el atrio derecho del ventrículo derecho.
Válvulas de inclinación de disco Válvulas cardiacas artificiales con un disco circular que regula el flujo de sangre.
Varianza Cantidad estadística que toma en cuenta un error al azar de una variedad de fuentes y proporciona información acerca de la difusión de los datos.
Varianza combinada Valor utilizado para determinar si dos conjuntos de muestras distintas son estadísticamente diferentes.
Vector de Burger Representación matemática de la magnitud y dirección de las distorsiones en una red cristalina causadas por dislocaciones.
Velocidad de deriva Velocidad promedio de los electrones debido a un campo eléctrico aplicado.
Vida de fatiga Número de ciclos a un nivel de tensión dado que un material puede experimentar antes de fallar.
Vidriado Mezcla de SiO_2 y óxidos de metal que se usan para cubrir material bisque y proporcionan color cuando son recocidos.
Vidrio de sílice Sólido no cristalino formado del enfriamiento del dióxido de silicio (SiO_2) fundido.
Vidrio de sosa-cal La composición de vidrio más común que incluye dióxido de silicio (72%), sosa (14%) y cal (7.9%) como constituyentes principales.
Vidrios Sólidos inorgánicos que existen en forma rígida pero no cristalina.
Vitrificación Proceso térmico en el que un sólido vidrioso desarrolla un movimiento a gran escala.
Vulcanización Proceso mediante el cual los entrecruzamientos químicos se pueden formar entre cadenas de polímeros adyacentes, fortaleciendo el material sin dañar significativamente las propiedades elásticas.

W

Wet out Calidad de enlace entre la fibra y la matriz en un material compuesto.

X

Xenoinjertos Implantes de tejidos de otras especies.

Z

Zona de depleción Área no conductiva entre la unión *p-n*, en la que se lleva a cabo la recombinación.

ÍNDICE

D

E

F

G

H

I

L

Q

R

S

T

NOTAS

N O T A S

NOTAS

NOTAS



APLICACIONES EN INGENIERÍA

Esta obra proporciona los elementos necesarios para una mejor comprensión de la Ciencia de Materiales, la cual está estrechamente vinculada y de manera cotidiana, a la Ingeniería.

Destaca por

- Su equilibrio, ya que expone un amplio espectro de los materiales disponibles.
- Su aplicación en diversos programas de ingeniería (aeroespacial, biológica, química, civil, eléctrica, industrial y mecánica entre otras).
- Su enfoque en los aspectos fundamentales en la selección de materiales y diseño incluyendo ética, consideraciones de los ciclos de vida y economía.

Aprenda

- A seleccionar los materiales según su finalidad, a través pruebas eficientes que garanticen que conserve sus propiedades durante la vida útil del producto.
- A medir e interpretar datos de las pruebas realizadas, así como las fallas de los mismos.

Conozca

- Las características, propiedades, aplicaciones y métodos de selección y medición, así como factores (tiempo, uso y exposición a condiciones ambientales) que alteran las propiedades de cada material.
- Las formas básicas del enlace atómico para relacionarlas con diversos grupos existentes de materiales como metales, polímeros y cerámicos.
- La importancia de los biomateriales: su clasificación, desarrollo y prospectiva.

Desarrolle sus habilidades para

- Elaborar diagramas de equilibrio de fase, su interpretación y aplicación de los datos que generan.
- Relacionar por medio de casos prácticos, la compatibilidad del material con su finalidad.

James Newell es Licenciado en Ingeniería Química y Biomédica (Carnegie-Mellon University), Maestro en Ingeniería Química (Penn State) y Doctor en Ingeniería Química (Clemson University). Autor de la sección "Fibras de carbono" para la *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, 3ª edición. Ha publicado más de 30 artículos y presentado sus investigaciones en conferencias en diversos países como España, Argentina, Inglaterra y Estados Unidos. Recibió el premio Raymond W. Fallen por parte de la ASEE por su contribución a la enseñanza de la ingeniería.

www.alfaomega.com.mx







"Te acerca al conocimiento"

